



UNIUNEA EUROPEANĂ



GUVERNUL ROMÂNIEI  
MINISTERUL MUNCII, FAMILIEI ȘI  
PROTECȚIEI SOCIALE  
AMPOSDRU



Fondul Social European  
POS DRU 2007-2013



Instrumente Structurale  
2007-2013



MINISTERUL  
EDUCAȚIEI  
CERCETĂRII  
TINERETULUI  
ȘI SPORTULUI  
OIPOSDRU



### Investește în oamenii!

FONDUL SOCIAL EUROPEAN

Programul Operațional Sectorial Dezvoltarea Resurselor Umane 2007 – 2013

Axa prioritară: 1 „Educația și formarea profesională în sprijinul creșterii economice și dezvoltării societății bazate pe cunoaștere”

Domeniul major de intervenție: 1.5 „Programe doctorale și postdoctorale în sprijinul cercetării”

Titlul proiectului: Proiect de dezvoltare a studiilor de doctorat în tehnologii avansate - “PRODOC”

Cod Contract: POSDRU 6/1.5/S/5

Beneficiar: Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca

## FACULTATEA DE ELECTRONICĂ, TELECOMUNICAȚII ȘI TEHNOLOGIA INFORMAȚIEI

Ing. **Melinda Barabás**

# REZUMATUL TEZEI DE DOCTORAT

## MANAGEMENTUL RUTĂRII ÎN VIITORUL INTERNET

**Conducător științific,  
Prof.dr.ing. Virgil DOBROTĂ**

### Comisia de evaluare a tezei de doctorat:

- Președinte: - Prof.dr.ing. **Monica Borda** - Facultatea de Electronică, Telecomunicații și Tehnologia Informației, Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca;
- Membri: - Prof.dr.ing. **Virgil Dobrotă** - Conducător științific, Facultatea de Electronică, Telecomunicații și Tehnologia Informației, Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca;
- Prof.dr.ing. **Radu Vasiu** - Referent, Universitatea „Politehnică” din Timișoara;
- Prof.dr.mat. **Florian Mircea Boian** - Referent, Universitatea „Babes-Bolyai” din Cluj-Napoca;
- Prof.dr.ing. **Aurel Vlaicu** - Referent, Facultatea de Electronică, Telecomunicații și Tehnologia Informației, Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca.

Susținerea publică a tezei de doctorat: 23 septembrie 2011, ora 09:00  
Aula "Alexandru Domșa"  
Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca  
Strada Constantin Daicoviuciu, nr. 15

# Mulțumiri

Teza de doctorat a fost elaborată în perioada anilor 2008–2011, în cadrul Universității Tehnice din Cluj-Napoca, Facultatea de Electronică, Telecomunicații și Tehnologia Informației.

În mod deosebit doresc să mulțumesc conducătorului științific, prof.dr.ing. Virgil DOBROTĂ, pentru îndrumarea, rigurozitatea și sprijinul permanent acordat pe toată perioada pregătirii și elaborării tezei de doctorat. Mulțumesc și colegilor din cadrul colectivului Unified Communications Laboratories: conf.dr.ing. Daniel ZINCA, șl.dr.ing. Tudor Mihai BLAGA, as.dr.ing. Cristian Mihai VANCEA, dr.ing. Andrei Bogdan RUS, ing. Gabriel LAZĂR, ing. Georgeta Lucia BOANEA și ing. Ioan Sabin SĂRMAȘ pentru întreaga colaborare.

De asemenea, le sunt recunoscătoare domnilor prof.dr.ing Aurel VLAICU, prorector al Universității Tehnice din Cluj-Napoca și conf.dr.ing Bogdan ORZA pentru sugestiile primite cu ocazia participării în comisia de evaluare a rapoartelor de cercetare științifică. Mulțumirile se îndreaptă și către conf.dr.ing Zsolt POLGÁR și ing. Zsuzsanna KISS pentru colaborarea reușită.

Mulțumesc echipei de cercetare de la Jozef Stefan Institute (JSI) din Ljubljana, în special domnului prof.dr.ing. Gorazd KANDUS și ing. Carolina FORTUNA, pentru schimbul de idei în cadrul stagiului de documentare efectuat la JSI în septembrie 2010.

Aduc deosebite mulțumiri domnului prof.dr.ing. Jordi DOMINGO-PASCUAL, conducător al grupului de cercetare Broadband Communications de la Universitat Politecnica de Catalunya (UPC), Barcelona, pentru sprijinul acordat pe durata stagiului de cercetare efectuat la UPC în perioada octombrie–decembrie 2010.

De asemenea, aduc mulțumiri managerului proiectului PRODOC, prof.dr.ing. Gheorghe LAZEA, directorul Școlii Doctorale, cât și doamnelor secretare Rodica BRAD, Dorina BĂRĂIAN și Livia HAIDUC.

Nu în ultimul rând doresc să mulțumesc familiei pentru sprijinul constant, înțelegerea și răbdarea de care a dat dovadă în toată această perioadă de timp.

Cluj-Napoca,  
Septembrie 2011

Cu deosebită stimă,  
ing. Melinda BARABÁS

# Cuprins

<b>1</b>	<b>Introducere</b>	<b>1</b>
1.1	Managementul rutării . . . . .	1
1.2	Motivația tezei . . . . .	2
1.3	Structura tezei . . . . .	2
<b>2</b>	<b>Fundamente teoretice</b>	<b>4</b>
2.1	Tehnici de management . . . . .	4
2.2	Tehnici de predicție . . . . .	6
<b>3</b>	<b>Stadiul actual al tehnicilor de management pentru viitorul Internet</b>	<b>8</b>
3.1	Limitările tehnologiilor curente de management . . . . .	8
3.2	Redefinirea principiilor de bază ale managementului . . . . .	8
3.3	Perspectivile viitoare în domeniul managementului rețelelor . . . . .	9
3.4	Strategii evolutive pentru management autonom . . . . .	9
3.5	Strategii clean-slate pentru management autonom . . . . .	10
3.6	Concluzii . . . . .	11
<b>4</b>	<b>Metodologii propuse pentru detecția congestiei</b>	<b>12</b>
4.1	Motivație . . . . .	12
4.2	Detecția congestiei prin evaluarea calității transmisiilor video . . . . .	12
4.3	Detecția congestiei prin evaluarea ratei de transfer disponibile . . . . .	16
4.4	Concluzii . . . . .	17
<b>5</b>	<b>Proiectarea și implementarea preliminară a unui sistem de management al rutării</b>	<b>18</b>
5.1	Motivație . . . . .	18
5.2	Proiectarea sistemului de management al rutării, conștient de starea rețelei . . . . .	18
5.3	Implementarea preliminară a sistemului propus . . . . .	22
5.4	Concluzii . . . . .	23
<b>6</b>	<b>Managementul congestiei prin activarea tehnicii Network Coding</b>	<b>24</b>
6.1	Motivație . . . . .	24
6.2	Activarea NC prin sistemul de auto-management . . . . .	24

6.3	Rezultate experimentale . . . . .	26
6.4	Concluzii . . . . .	28
<b>7</b>	<b>Managementul congestiei prin rutare QoS-aware</b>	<b>29</b>
7.1	Motivație . . . . .	29
7.2	Descrierea scenariului de testare . . . . .	30
7.3	Rezultate experimentale . . . . .	30
7.4	Concluzii . . . . .	32
<b>8</b>	<b>Implementarea și evaluarea tehnicilor de predicție a traficului</b>	<b>33</b>
8.1	Motivație . . . . .	33
8.2	Testarea performanțelor tehnicilor liniare de predicție . . . . .	33
8.3	Evaluarea tehnicilor liniare de predicție . . . . .	33
8.4	Evaluarea predicției prin rețele neuronale . . . . .	34
8.5	Comparația rezultatelor experimentale . . . . .	36
8.6	Concluzii . . . . .	37
<b>9</b>	<b>Îmbunătățirea managementului rutării prin predicție bazată pe rețele neuronale</b>	<b>38</b>
9.1	Introducere . . . . .	38
9.2	Implementarea practică a predictorului bazat pe rețele neuronale . . . . .	39
9.3	Integrarea predictorului în sistemul de management al rutării . . . . .	39
9.4	Evaluarea sistemului predictiv de management al rutării multicale . . . . .	40
9.5	Concluzii . . . . .	42
<b>10</b>	<b>Contribuții la managementul rutării în viitorul Internet</b>	<b>43</b>
10.1	Sumarul contribuțiilor personale . . . . .	43
10.2	Remarci finale . . . . .	46
10.3	Premii obținute . . . . .	46
10.4	Lista de publicații . . . . .	47
	<b>Bibliografie selectivă</b>	<b>49</b>

# Capitolul 1

## Introducere

### 1.1 Managementul rutării

Rutarea este procesul de alegere a căii de-a lungul căreia se transmite traficul din rețea, adică dirijarea unui pachet de la un nod sursă la un nod destinație. Procesul de rutare este alcătuit din două mecanisme: determinarea căii optime și comutația. Rutarea este esențială într-o rețea, iar scalabilitatea rutării este esențială într-o rețea de dimensiune mare. Dacă rutarea nu este corespunzătoare, acest lucru are un impact considerabil asupra stabilității și a performanței rețelei. Complexitatea rutării poate duce la dificultăți în ceea ce privește managementul rețelei, ceea ce va influența detectarea defecțiunilor și înlăturarea rapidă a problemelor. De aici poate rezulta scăderea calității serviciilor în întreaga rețea.

Managementul rutării presupune existența anumitor criterii administrative pentru tratarea informațiilor de rutare, de obicei sub forma selectării căii de rutare optime, respectiv filtrarea rutelor. Modul în care este tratată informația de rutare influențează direct fluxul de trafic din interiorul rețelei și între domeniile de rutare. Elementele cheie prin care se poate reduce complexitatea rutării sunt schemele de rutare sistematice și consecvente, respectiv o politică de rutare simplă, dar care îndeplinește cerințele strategiilor administrative.

Obiectivul managementului rutării, conform [Med07], este acela de a mări rata de transfer oferită de rețea, garantând în același timp o performanță a rețelei situată între nivelele specificate. Aspectele de interes ale managementului rutării sunt de exemplu: monitorizarea numărătoarelor de pachete ale diferitelor interfețe, configurarea parametrilor de timeout ale protocoalelor, detecția congestiei pe diferite legături, determinarea metricii în funcție de traficul existent pe fiecare legătură etc.

Proiectarea unei strategii de rutare este dificilă deoarece depinde de un număr mare de variabile și de parametri care sunt câteodată nesiguri. Această complexitate este mărită și de diversitatea necesităților de rată de transfer și de performanță ale diferitelor conexiuni. În plus, politica de rutare trebuie să fie adaptivă pentru a putea face față modificărilor apărute în rețea: modificări topologice și schimbări ale condițiilor de trafic. Managementul rutării administrează funcțiile de rutare ale rețelei astfel încât să maximizeze disponibilitatea rețelei, garantând în același timp cerințele de performanță ale conexiunilor curente și viitoare.

Scopul unui sistem de management al rutării este monitorizarea utilizării resurselor rețelei și ajustarea adaptivă a parametrilor și a metricilor protocoalelor de rutare, în funcție de condițiile de trafic. Astfel se urmărește crearea unui echilibru între calitatea serviciilor oferite și gradul de utilizare a resurselor.

## 1.2 Motivația tezei

Implicarea colectivului Unified Communications Laboratories în proiectul FP7-4WARD "Architecture and Design for the Future Internet" a evidențiat faptul că există domenii neacoperite în ceea ce privește managementul rețelelor, și anume managementul rutării în viitorul Internet.

Managementul centralizat, întâlnit în rețelele din prezent, nu va mai fi aplicabil în cazul topologiilor de scară largă și al serviciilor prevăzute în viitor. Din acest motiv sunt necesare abordări noi în ceea ce privește instrumentele de management al rețelelor viitoare. Noile tendințele în domeniul administrării rețelelor se concentrează asupra unor rețele autonome, scalabile, inteligente, care nu necesită intervenția unui utilizator uman.

Principalele probleme care trebuie rezolvate de managementul în viitorul Internet, din punct de vedere al operațiilor de rutare sunt următoarele:

- Detectarea anomaliilor și a defecțiunilor prin realizarea unor statistici periodice pe termen lung și scurt sau folosind un model de predicție.
- Managementul dinamic, inteligent al congestiilor și echilibrarea încărcării (*load balancing*) în vederea optimizării performanței și a capacității globale/locale. Acest lucru presupune măsurători de trafic și QoS (Quality of Service) asigurat pe baza cărora se reconfigurează tabela de rutare.
- Managementul traficului, rerutarea și comutarea pachetelor, asigurarea calității serviciilor, adaptarea rutării alegând dintre diferite instrumente de redirecționare a pachetelor.

Sistemul de management al rutării trebuie să alcătuiască o parte intrinsecă a rețelei și să fie caracterizat de *situation-awareness*, scalabilitate, robustețe, funcții autonome și capacitate de învățare. Un management intrinsec al rutării înseamnă că acesta este inclus încă din faza de proiectare în interiorul protocoalelor de comunicare.

Ideea de bază de la care s-a pornit a fost separarea procesului de monitorizare/actualizare a stării rețelei de procesul de rutare în sine. Această abordare presupune o strategie de tip clean-slate, regândind întregul proces de rutare. S-a prevăzut un sistem de management care preia anumite funcții care în mod tradițional aparțin de protocolul de rutare, de exemplu: comunicarea cu nodurile vecine, descoperirea topologiei, verificarea conectivității, efectuarea de măsurători etc.

Prezenta teză de doctorat a fost realizată în strânsă colaborare cu ing. Georgeta BOANEA, fiind corelată cu teza "Îmbunătățirea rutării multicale în viitorul Internet". O parte din rezultatele preliminare obținute au fost valorificate în cadrul proiectului 4WARD. Activitatea de cercetare a fost diseminată și validată prin publicații în reviste de specialitate (ACTA TECHNICA NAPOCENSIS) și articole prezentate la conferințe din țară și din străinătate (IEEE SOFTCOM 2009, IEEE LANMAN 2010, IEEE SOFTCOM 2010, KTTO 2011, RoEduNet 2011, IEEE ICCP 2011, EMERGING 2011).

## 1.3 Structura tezei

Prezenta teză de doctorat este structurată în 10 capitole.

**Capitolul 2 „Fundamente teoretice”** are rol introductiv și este alcătuit din două părți distincte. Prima parte oferă o scurtă prezentare a tehnologiilor de management existente și utilizate în prezent, împreună cu caracteristicile principale ale acestora. A doua parte se ocupă de tehnici de predicție. Se descriu metricile de performanță folosite pentru evaluarea preciziei, după care sunt prezentate principalele metode de predicție, urmate de o comparație a acestora din punct de vedere al aplicabilității lor în domeniul prezicerii traficului.

În cadrul **Capitolului 3 „Stadiul actual al tehnicilor de management pentru viitorul Internet”** sunt prezentate rezultatele actuale ale cercetărilor în domeniul tehnicilor de management folosite în viitorul Internet. Se identifică limitările tehnologiilor curente, împreună cu perspectivele viitoare în domeniul administrării rețelelor. Sunt descrise noi tehnici de management autonom, bazate pe strategii evolutive și abordări clean-slate.

**Capitolul 4 „Metodologii propuse pentru detecția congestiei”** discută două metode care permit detecția congestiei pe legăturile dintr-o rețea IP. Prima metodă se bazează pe evaluarea calității fluxurilor video transmise prin protocolul RTP (Real-time Transport Protocol), urmărind evoluția metricilor de calitate video (VQ – Video Quality) precum: numărul de pachete pierdute, rata de succes a transmisiei, magnitudinea pierderilor, frecvența pierderilor, jitterul etc. Cea de-a doua metodă propusă presupune monitorizarea ratei de transfer disponibile pe toate legăturile unidirecționale din rețea, fiind calculați următorii indicatori statistici: media simplă mobilă (SMA – Simple Moving Average) și deviația standard (SD – Standard Deviation).

**Capitolul 5 „Proiectarea și implementarea unui sistem de management al rutării”** descrie sistemul autonom propus prin care este posibil managementul rutării în funcție de starea actuală a rețelei. Se definesc două tipuri de entități de management: 1) *entitatea de management local* (LME – Local Management Entity) care se ocupă de aspectele locale ale gestionării rutării și 2) *entitatea de management de domeniu* (DME – Domain Management Entity) responsabilă de problemele care necesită o viziune globală asupra rețelei. Se descrie proiectarea entităților, respectiv implementarea practică a acestora.

**Capitolul 6 „Managementul congestiei prin activarea tehnicii Network Coding”** identifică o posibilă aplicație a sistemului de management al rutării în viitorul Internet, și anume managementul congestiei utilizând tehnica Network Coding (NC). Se descrie mecanismul de activare a codării traficului pe baza conștientizării stării rețelei, împreună cu scenariul de testare a soluției propuse și rezultatele experimentale obținute cu ajutorul unei implementări practice preliminare.

**Capitolul 7 „Managementul congestiei prin rutare QoS-aware”** descrie o altă aplicabilitate a sistemului de management implementat: comandarea unui protocol de rutare cu metrică dinamică, într-un mod conștient de starea rețelei astfel încât să se evite rutele congestionate. Soluția este testată într-o topologie de rețea reală și se compară cu modul de funcționare al protocolului de rutare OSPF (Open Shortest Path First).

În **Capitolul 8 „Implementarea și evaluarea tehnicilor de predicție a traficului”** se analizează și se compară performanța tehnicilor de predicție a traficului de rețea. Se evaluează capacitatea de predicție atât a tehnicilor liniare: a) modelul ARMA (AutoRegressive Moving Average), b) algoritmul ARAR (AutoRegressive AutoRegressive) și c) algoritmul Holt–Winters nesezonal și sezonă; cât și a tehnicilor neliniare bazate pe rețele neuronale, analizând atât problema învățării single-task și multi-task, cât și problema instruirii multirezoluție prin folosirea transformatei wavelet, respectiv combinarea acestor abordări.

**Capitolul 9 „Îmbunătățirea managementului rutării prin predicție bazată pe rețele neuronale”** propune o metodă de îmbunătățire a managementului rutării multicale QoS-aware prin intermediul predicției ratei de transfer disponibile pe legăturile rețelei. Se descrie implementarea practică a predictorului bazat pe rețele neuronale cu învățare multi-task și integrarea acestuia în sistemul de management al rutării.

Lucrarea se încheie cu **Capitolul 10 „Contribuții la managementul rutării în viitorul Internet”** în care sunt sintetizate contribuțiile aduse în domeniul studiat. Acest capitol include remarci finale, premiile obținute și lista publicațiilor personale.



# Capitolul 2

## Fundamente teoretice

### 2.1 Tehnici de management

#### 2.1.1 Introducere

În sens tradițional, managementul presupune o aplicație care permite unui sistem de tip manager să monitorizeze și să controleze echipamentele de rețea. Managementul rețelelor contribuie la creșterea eficienței operaționale și la scăderea costurilor, asigurând utilizarea eficientă a resurselor, respectiv creșterea disponibilității rețelei și a calității serviciilor. Managementul rețelelor, după definiția din [Cle07], se referă la activități, metode, proceduri și instrumente care sunt caracteristice operării, administrării, întreținerii și aprovizionării unei rețele. O arhitectură de management este alcătuită din componenta de comunicare, componenta funcțională și componenta informațională.

Cel mai folosit model de referință în domeniul Internet este FCAPS (Fault, Configuration, Accounting, Performance, Security), care se potrivește mai degrabă întreprinderilor și furnizorilor de date. Un alt model de referință este OAM&P (Operation, Administration, Maintenance, and Provisioning) care realizează o structurare diferită a funcțiilor și este popular mai ales în cazul furnizorilor de servicii de telecomunicații.

##### 2.1.1.1 Paradigme de management

Paradigmele de management pot fi clasificate în două mari categorii, conform [Mar99]:

- *Managementul centralizat* presupune existența unui sistem de management care supervizează întreaga activitate, concentrând toate procesările de management într-o singură stație.
- *Managementul distribuit* (descentralizat) se bazează pe delegarea sarcinilor la alte entități. Delegarea poate fi verticală sau orizontală:
  - *Managementul slab distribuit*: rolul agenților se limitează la colectarea de date de la dispozitivele gestionate.
  - *Managementul puternic distribuit* se bazează pe cod mobil și pe obiecte distribuite.
  - *Managementul cooperativ* se realizează prin intermediul unor agenți inteligenți care știu cum să rezolve o anumită problemă fără a primi instrucțiuni specifice.

##### 2.1.1.2 Modelul manager-agent

Modelul manager-agent, prezentat în Figura 2.1, definește principiile de funcționare ale unui framework de management bazat pe protocol. Un cluster de obiecte este administrat în mod colectiv de către un agent care furnizează un punct unic de intrare pentru accesarea lor.

Un agent este o entitate software/hardware care rulează în interiorul echipamentelor monito-

rizate, implementând diferite funcții. Acesta oferă o interfață prin care managerul poate comunica cu elementul de rețea. Procesul de comunicare dintre manager și agent este asimetric și se realizează prin interogare sau prin evenimente, respectiv prin combinația celor două.

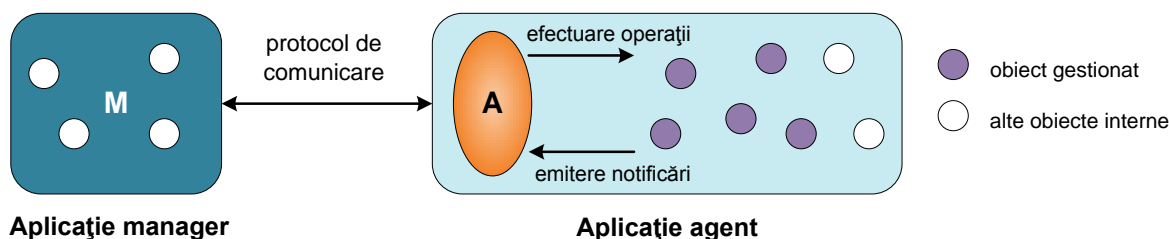


Figura 2.1 Modelul manager-agent [Pav07]

## 2.1.2 Evoluția tehnologiilor de management

Managementul rețelelor, al sistemelor și al serviciilor a evoluat într-o disciplină științifică importantă. Nici după 25 de ani de cercetări și standardizări nu s-a ajuns încă la o înțelegere în ceea ce privește modelarea și accesul distribuit la informația de management. Deși există standardizări care au fost implementate și folosite în practică, cum ar fi OSI-SM (Open Systems Interconnection – System Management) pentru mediile de telecomunicații și SNMP (Simple Network Management Protocol) pentru mediile de tip „enterprise” bazate pe IP (Internet Protocol), totuși se caută permanent noi protocoale, cadre de lucru cu aplicabilitate universală.

Evoluția tehnologiilor de management poate fi grupată pe cinci categorii, conform [Pav07]: 1) tehnologii procedurale; 2) abordări bazate pe protocoale generice, bazate pe obiecte; 3) abordări bazate pe obiecte distribuite; 4) management prin delegare și abordări de tip „cod mobil” și 5) abordări bazate pe XML (eXtensible Markup Language) și Web. O descriere a evoluției tehnologiilor de management poate fi găsită și în [Day08], dar prezentată după alte criterii.

## 2.1.3 Taxonomia soluțiilor de management

O taxonomie completă a abordărilor, a cadrelor de lucru și a protocoalelor de management poate fi găsită în [Pav07], prezentată în Tabelul 2.1.

Categorizarea tehnologiilor de management se realizează după două criterii diferite. Primul se referă la modul de executare a sarcinilor:

- *management prin invocare la distanță*: OSI-SM, SNMP, COPS-PR (Common Open Policy Service for Provisioning), CORBA (Common Object Request Broker Architecture), JRM (Java Remote Method Invocation), WBEM (Web-Based Enterprise Management), NetConf (Network Configuration Protocol), WS (Web Service), Netflow, IPFIX (Internet Protocol Flow Information eXport);
- *management prin delegare*, trimitând logica de management la dispozitivele administrate: Scripting MIB (Management Information Base) și Command Sequencer.

Există două modalități diferite de a efectua invocarea metodelor la distanță:

- prin *modelul manager-agent*: OSI-SM, SNMP, COPS-PR, WBEM, Netflow, NetConf și IPFIX;
- prin *modelul de obiecte și interfețe de serviciu distribuite*, invocând direct obiectele gestionate: CORBA, JRM și WS.

Tabela 2.1 Clasificarea tehnologiilor de management

Tehnologia de management	Modul de îndeplinire a sarcinilor de management		Modelul de management	
	Prin invocare la distanță	Prin delegare	Model manager-agent	Model obiect/interfață de serviciu
Command Sequencer		x	x	
COPS-PR	x		x	
CORBA	x			x
IPFIX	x		x	
JRMI	x			x
NetConf	x		x	
Netflow	x		x	
OSI-SM	x		x	
Sripting MIB		x	x	
SNMP	x		x	
WBEM	x		x	
WS	x			x

## 2.2 Tehnici de predicție

### 2.2.1 Modelul ARMA

Modelul ARMA (Autoregressive Moving Average) este cel mai popular model folosit pentru modelarea și predicția seriilor temporale liniare [Das08]. Avantajul metodei este dat de acuratețea pe un domeniu mai larg de serii, deși metoda este complexă din punct de vedere computațional [Cor06]. Modelul ARMA( $p, q$ ) se bazează pe o combinație liniară a valorilor trecute (componente de ordin  $p$  AR – Autoregressive) și a erorilor (componente de ordin  $q$  MA – Moving Average).

### 2.2.2 Algoritmul ARAR

Prin algoritmul ARAR (AutoRegressive AutoRegressive) o serie temporală este transformată dintr-un filtru AR de memorie lungă într-unul de memorie scurtă, după care se atașează datelor astfel obținute un model ARMA [Chu08]. După ce se alege modelul, se pot determina predictorii liniari cu eroarea medie pătratică minimă folosind o recursie.

### 2.2.3 Algoritmul Holt–Winters

Tehnica Holt–Winters (HW) face parte din familia metodelor de netezire exponențială. Conform [Cor06], modelul de predicție se bazează pe pattern-uri (de exemplu trend/tendințe sau caracteristici sezoniere) care se deosebesc de zgomotul aleator prin medierea valorilor istorice. Avantajele acestei metode constau în simplitatea folosirii, overhead computațional redus și precizia predicției.

Există două versiuni ale algoritmului [Bro02]:

- *algoritmul Holt–Winters nesezonal* generează predicții pentru serii temporale care conțin un trend liniar local;
- *algoritmul Holt–Winters sezonal* (HWS — Holt–Winters Seasonal) aplicat unor date care prezintă atât o componentă de trend, cât și o componentă sezonală.

## 2.2.4 Predicție pe baza transformatei wavelet

Ideea de bază a folosirii metodelor de tip wavelet în predicție este de a descompune semnalul original în componente de diferită rezoluție (scală), după care se aplică metode de predicție pentru fiecare componentă în parte. Prin niveluri mai joase de descompunere se pot capta dependențele lungi (LRD – Long-Range Dependence), pe când nivelurile mai ridicate redau dependențele temporale pe termen scurt. Sarcina dificilă de predicție asociată semnalului original poate fi simplificată prin analiză multirezoluție: predicția sub-semnalelor la niveluri de rezoluție mai mici, sub-semnale obținute prin aplicarea transformatei wavelet [Par09].

## 2.2.5 Rețele neuronale

Rețelele neuronale (NN – Neural Network) sunt intens folosite în modelare și predicție, deoarece pot învăța și reproduce patternuri complexe, respectiv pot estima aproape orice funcție într-o manieră eficientă și stabilă [Dha10]. Acestea reprezintă o metodă de modelare neliniară, neparametrică, adaptivă și nu se bazează pe un model analitic, ci pe datele observate care determină structura și parametrii modelului [Abd05].

NN sunt candidați naturali pentru predicție datorită capacităților de toleranță la erori, adaptabilitatea neliniară, posibilitatea de procesare paralelă a informațiilor, ușurința implementării etc. [Rod10]. Cele mai importante avantaje oferite de folosirea rețelelor neuronale sunt:

- Nu trebuie să facem nicio presupunere referitoare la relația dintre parametrii modelului.
- Nu trebuie să presupunem o descriere matematică a fenomenului analizat [Abd05].
- Deși nu ajută în înțelegerea cauzelor (nu poate furniza explicații), comportându-se ca o cutie neagră (*black box*), pot estima legătura dintre intrările și ieșirile sistemului.
- Constituie o metodă robustă care reflectă schimbări în comportamentul și dinamica traficului.

Rețelele neuronale cu învățare multi-task (MTL – Multi-Task Learning) antrenează paralel mai multe taskuri între care există o legătură, profitând de informațiile specifice domeniului, ascunse în taskurile suplimentare. Astfel este posibilă îmbunătățirea preciziei predicției [Rod10].

Paradigma de învățare multirezoluție exploatează structurile de corelație găsite la rezoluții diferite ale datelor de antrenare. Această metodă descompune instruirea tradițională în mai multe sub-etape, fiecare implicând un semnal de o anumită rezoluție. Ideea de bază este de a porni de la învățarea rezoluțiilor mai grosiere, urmată de învățarea rezoluțiilor mai fine [Lia04]. Performanța predicției poate fi îmbunătățită în mod semnificativ [Lia06].

## 2.2.6 Comparația tehnicilor de predicție

Comparația tehnicilor de predicție din punct de vedere al aplicabilității acestora în domeniul predicției traficului de rețea este o sarcină dificilă. De obicei, problemele legate de predicție adaptivă sunt rezolvate prin utilizarea unor perspective liniare sau neliniare, fiecare având avantaje și dezavantaje. În prezent, o serie de metode de predicție au fost propuse și implementate/simulate în literatură: serii temporale AR și MA, modele de netezire exponențială HW, metode bazate pe transformata wavelet, metode NN, filtre Kalman, modele Markov, abordări fuzzy–neuronale etc.

Anumite articole ([Fen05], [Ana08], [Li09b] etc.) enunță că modelele liniare de predicție nu sunt capabile să descrie exact toate caracteristicile traficului de rețea. Din acest motiv se recomandă folosirea unor modele neliniare, de exemplu modelul wavelet, rețele neuronale etc. În același timp, există studii care confirmă aplicabilitatea predictorilor liniari pentru predicția în timp real a traficului ([Abd05], [Cai10], [Kul10] etc.)

## Capitolul 3

# Stadiul actual al tehnicilor de management pentru viitorul Internet

### 3.1 Limitările tehnologiilor curente de management

Lumea Internetului, așa cum o cunoaștem astăzi, a suferit schimbări majore, devenind o importantă infrastructură de comunicare care oferă conectivitate oriunde și oricând. Se anticipează că Internetul din prezent nu va putea fi capabil să suporte, pe termen lung, utilizările în continuă creștere, respectiv constrângerile și cerințele pe care va trebui să le înfrunte în timp ce pătrunde din ce în ce mai mult în mediul nostru înconjurător. Modelul prezent al Internetului se bazează pe o separare clară între straturile de protocol, cu inteligența mutată la marginile rețelei și cu un accent redus în ceea ce privește sarcinile de management [Mih09b].

Sistemelor tradiționale de management li se reproșează cel mai des faptul că soluțiile tehnice oferite pentru managementul rețelelor nu sunt suficiente de „integrate”, precum și faptul că tind să se concentreze în principal asupra gestionării defecțiunilor și să opereze reactiv. Conform [Cle07], soluția o reprezintă creșterea nivelului de automatizare și a posibilității de administrare.

### 3.2 Redefinirea principiilor de bază ale managementului

Deși există diferite soluții pentru rezolvarea problemelor de management, niciuna nu este completă, perfectă, fiind necesară găsirea unei tehnologii de generație viitoare care să cuprindă toate aspectele gestionării rețelelor și care să ofere un răspuns la provocările Internetului de mâine. Principiile care trebuie să domine viitorul Internetul sunt interoperabilitatea, auto-administrarea, accesul liber și accesul punct-la-punct [Mih09b].

Trebuie realizat un sistem de management scalabil, robust, de complexitate scăzută, potrivit pentru rețele dinamice de scară largă. Noile tendințele în domeniul managementului rețelelor se concentrează asupra unor rețele autonome, inteligente, care nu necesită intervenția unui utilizator uman, ci dispun de o arhitectură distribuită de management, integrată direct în rețea, conform [Rot09]. Funcționalitățile de auto-administrare trebuie integrate în toate sistemele viitorului Internet, iar acestea trebuie să funcționeze în mod automat, ca o parte intrinsecă a rețelei. Inteligența nu va fi concentrată într-un dispozitiv central, ci va fi distribuită între elementele de rețea.

În ceea ce privește managementul rutării în viitorul Internet, acesta implică: *a*) dezvoltarea unor metode robuste și adaptive prin care se poate detecta congestia; *b*) realizarea unui control digital adaptiv de tip cross-layer; *c*) controlarea dinamică a încărcării și a proceselor; *d*) detectarea vulnerabilității și invocarea unor strategii eficiente de diminuare a acesteia; *e*) activarea unor soluții adaptive de rutare; *f*) alegerea algoritmului de calcul al rutelor, în funcție de starea actuală a rețelei; *g*) optimizarea procedurilor de control folosite în infrastructura de transport și de servicii.

### 3.3 Perspectivele viitoare în domeniul managementului rețelelor

În articolul [Gup06] se prezintă câteva perspective de viitor ale evoluției domeniului de management al rețelelor.

- *Soluții de management de tip Environment Aware* își adaptează funcționarea la starea rețelei. Datele istorice colectate pot oferi unele indicații cu privire la hot-spoturi existente în rețea și potențialele zone asupra cărora să se concentreze sistemul. În ceea ce privește monitorizarea metricilor pentru conștientizarea stării, este important să se detecteze depășirea pragurilor corespunzătoare unor parametri globali, cum ar fi încărcarea medie a rețelei.
- *Soluții bazate pe Swarm Intelligence* se inspiră de la comportamentul colectiv în regnul animal și se pretează la rezolvarea problemelor distribuite. Agenți simpli interacționează cu mediul lor și comunică cu alți agenți pentru a rezolva probleme globale complexe.
- *Sisteme expert de codificare a cunoștințelor de management* reprezintă sisteme inteligente care pot imita acțiunile umane ca răspuns la stimuli externi.
- *Management predictiv* ar putea prezice întreruperile, funcționarea defectuoasă a dispozitivelor sau ar putea oferi o avertizare timpurie pentru defecțiunile de rețea iminente. Analiza evenimentelor din trecut ar putea forma baza pentru previziunile viitoare.
- *Rețele autonome cu dispozitive inteligente* sunt caracterizate de calcul autonom, fiind capabile de auto-diagnosticare, auto-gestionare, scutind utilizatorii de nevoia de a cunoaște complexitatea lor internă.

### 3.4 Strategii evolutive pentru management autonom

Viziunea de calcul autonom poate fi văzută ca o infrastructură de auto-gestionare în care echipamentele dispun de software care permite auto-configurarea, auto-optimizarea, auto-vindecarea, auto-protecția [Ber07]. Astfel este posibilă adaptarea funcționalității sistemului în funcție de schimbarea condițiilor de utilizare și a regulilor de business [Jen07].

#### 3.4.1 PBNM

Paradigma de management bazat pe politici (PBNM – Policy-Based Network Management) a fost dezvoltată cu scopul de a reduce complexitatea configurării dispozitivelor și pentru ca rețeaua să se poată adapta la condițiile fluctuante. Scopul unui astfel de sistem este acela de a separa regurile de comportament al rețelei de codul care implementează funcționalitatea dispozitivelor [Gal08]. În prezent se lucrează la definirea unor standarde care se bazează pe paradigma PBNM. În [Bal09] se propune un algoritm descentralizat inspirat din modul de funcționare al sistemelor biologice, bazat pe politici, prin care se poate realiza managementul rutării.

#### 3.4.2 ASA

Arhitectura ASA (Autonomic Service Architecture), prezentată în detaliu în [Far05] și [Che06], reprezintă un cadru de lucru de management autonom pentru furnizarea serviciilor în rețele IP. Acest framework permite reducerea costurilor asociate cu livrarea serviciilor. Soluția introduce diferite nivele de abstractizare în care serviciile sunt construite deasupra unor resurse virtuale și



fizice. ASA a fost proiectat astfel încât să permită managementul autonom al resurselor, garantând în orice moment de timp îndeplinirea SLA (Service Level Agreements) dintre furnizor de serviciu și consumator. Virtualizarea permite simplificarea gestionării resurselor, furnizând o interfață uniformă pentru toate resursele fizice eterogene, cum ar fi routere, legături și dispozitive de stocare.

### 3.4.3 FOCALÉ

Arhitectura de management autonom denumită FOCALÉ (Foundation Observation Comparison Action Learn Reason), prezentată în [Jen07], subliniază utilizarea unor modelări informaționale și ontologice în vederea acumulării cunoștințelor despre capabilitățile și constrângerile de rețea, respectiv pentru a obține o reprezentare abstractă a funcționalităților. Se prevăd tehnici artificiale de învățare și de raționament prin care se analizează cunoștințe colectate, respectiv se pot genera în mod automat cunoștințe noi. Sistemul FOCALÉ se caracterizează printr-un nivel înalt de autonomie, interacțiunea umană este prevăzută doar în vederea definirii scopurilor de afaceri.

## 3.5 Strategii clean-slate pentru management autonom

O strategie de tip *clean-slate* presupune redefinirea completă a arhitecturii, a conceptelor și a principiilor pe care se bazează managementul, spre deosebire de strategia evolutivă care îmbunătățește abordările existente prin adăugarea unor noi funcționalități.

### 3.5.1 ANA

Proiectul ANA (Autonomic Network Architecture) vizează explorarea unor modalități noi de organizare și utilizare a rețelelor, proiectând și dezvoltând arhitecturi cu capabilități de tip *auto-x*. Arhitectura ANA permite adaptarea și reorganizarea rețelei în funcție de necesitățile funcționale, economice și sociale ale utilizatorilor. Obiectivul este includerea procesului de monitorizare ca parte integrantă în arhitectura de rețea, fără a presupune o cunoaștere apriori a rețelei, funcțiile de monitorizare putând fi plasate și configurate în mod dinamic.

### 3.5.2 AutoI

Proiectul AutoI (Autonomic Internet Project) își propune crearea unui overlay a resurselor de comunicații, caracterizat de autonomie [Gal08]. Scopul urmărit este asigurarea furnizării rapide și garantate a serviciilor, respectiv a mobilității și a fiabilității acestora. AutoI proiectează și dezvoltă o infrastructură software și instrumente care permite compunerea unor servicii într-o manieră mai eficientă, respectiv executarea acestora într-un mod adaptiv. Au fost identificate următoarele provocări-cheie care reprezintă baza proiectării AutoI: virtualizarea resurselor de rețea și a resurselor de servicii, livrarea automată a serviciilor, auto-administrarea, „context-awareness”.

### 3.5.3 Self-NET

Self-NET (Self-Management of Cognitive Future InterNET Elements) [Kou08] se bazează pe un grad ridicat de autonomie a dispozitivelor de rețea pentru a permite managementul distribuit și optimizări locale continue. Arhitectura Self-NET se bazează pe modelul unui ciclu generic cognitiv alcătuit din procesul de monitorizare, procesul de luare a deciziilor și procesul de execuție

[Mih09b]. Se investighează diferite aspecte legate de rutare (formarea rutelor, optimizarea) și de facilitare (adresarea, interacțiunea cu alte mecanisme de dirijare a pachetelor). Self-NET își propune să ofere soluții pentru acționarea sincronă a diferitelor protocoale și proprietăți necesare pentru efectuarea etapelor de auto-configurare, incluzând rutarea, dar, de asemenea, ajustarea altor caracteristici de rețea relevante din punct de vedere cognitiv [Mih09a].

### 3.5.4 INM

Proiectul 4WARD – "Architecture and Design for the Future Internet" adresează probleme legate de arhitectura și proiectarea viitorului Internet [Rot09]. Se definește o nouă paradigmă: In-Network Management (INM). Aceasta oferă suport pentru rețele de scară largă care se autoconfigurează, se adaptează dinamic la evenimente externe, minimizând necesitatea intervenției umane. Scopul urmărit este cel al creșterii nivelului de automatizare în rețelele de viitor [Bru08].

INM dorește să realizeze managementul autonom prin intermediul unor capacități de auto-gestionare și învățare. Procesele de luarea deciziei sunt mutate în nodurile rețelei. Se propune separarea monitorizării de rutarea propriu-zisă. Detecția anomaliilor de rețea și a defecțiunilor de noduri și legături se realizează într-un mod distribuit. Monitorizarea, detecția anomaliilor și conștientizarea situației sunt elemente funcționale de bază ale planului de management INM [Nun09].

## 3.6 Concluzii

Tabelul 3.1 prezintă principalele funcționalități ale managementului autonom în viitorul Internet și identifică care dintre acestea sunt prevăzute în soluțiile analizate. Se arată cum se încadrează în această clasificare sistemul de management al rutării propus în această teză de doctorat. Soluția propusă se inspiră mai ales din ideile întâlnite în cadrul soluțiilor Self-NET (ciclu generic cognitiv; agenți multipli cu funcționalități diferite, responsabili de aspecte locale și globale ale rutării) și INM (separarea monitorizării de rutare; monitorizare în timp real; raportări legate de măsurători pe baza unor statistici; strategie de rutare adaptivă).

Tabela 3.1 Clasificarea soluțiilor de management autonom

Soluții analizate	Paradigmă		Funcționalități					Strategie		
	Centralizat	Distribuit	Conștientizarea stării	Swarm Intelligence	Sistem expert	Management predictiv	Funcții auto-X	Aspecte legate de rutare	Evolutivă	Clean-slate
PBNM	X		X	X	X		X	X	X	
ASA		X	X		X		X		X	
FOCALE	X		X		X	X	X		X	
ANA		X	X		X	X	X			X
AutoI		X	X		X		X			X
Self-NET		X	X		X	X	X	X		X
INM		X	X		X	X	X	X		X
Sistemul propus pentru managementul rutării		X	X		X	X	X	X		X



## Capitolul 4

# Metodologii propuse pentru detecția congestiei

### 4.1 Motivație

Asigurarea calității serviciilor (QoS – Quality of Service) este o cerință de bază prin care se poate oferi suport pentru serviciile curente și viitoare de rețea [Mas10]. QoS se referă la un set de cerințe care trebuie îndeplinite pe durata transportării unui flux de trafic. Scopul este de a garanta capacitatea rețelei privind furnizarea unor valori previzibile ale ratei de transfer, întârzierii, jitterului și pierderilor de pachete. Rata de transfer reprezintă un parametru de bază deoarece dacă nu sunt îndeplinite cerințele legate de aceasta, vor fi afectați și ceilalți parametri.

Congestia este un eveniment nedorit în rețelele de comunicații deoarece poate duce la degradarea severă a calității serviciilor. În cazul rețelelor IP tradiționale întâlnim des blocaje (bottleneck) dacă capacitatea unei legături nu este suficientă pentru a transporta traficul de intrare. Aceste blocaje se datorează caracterului de tip Best Effort (BE) al Internetului. Modelul de livrare BE este nesatisfăcător din punct de vedere al serviciilor care sunt sensibile la pierderi de pachete și necesită întârziere și jitter redus, cum ar fi servicii video, teleconferințe și alte aplicații interactive, deoarece transmisiile intermitente de imagine și de voce sunt intolerabile, iar retransmiterea pachetelor nu este o opțiune viabilă în acest caz [Cai10].

### 4.2 Detecția congestiei prin evaluarea calității transmisiilor video

Prima metodă de detecție a congestiei, propusă în această teză de doctorat, presupune monitorizarea de către routere a metricilor obiective de calitate video, corespunzătoare fluxurilor RTP (Real-time Transport Protocol) care trec prin nodul respectiv. Metricile VQ (Video Quality) nu se calculează doar la utilizatorul final, ci pe nodurile care alcătuiesc ruta urmată de fluxul video. O astfel de abordare permite nu doar detecția fenomenului de congestie, ci și localizarea acesteia.

#### 4.2.1 Metrici VQ corespunzătoare fluxurilor RTP

În lucrarea de față, detecția congestiei pe baza metricilor VQ se concentrează asupra transmisiilor video care implică protocolul RTP. Câmpurile care vor fi utilizate din antetul RTP pentru calcularea metricilor VQ sunt: tipul de payload încapsulat, numărul de ordine al pachetului (SN – Sequence Number) și timestampul. Evaluarea calității transmisiei se realizează prin analiza fluxului de transport la nivelul pachetelor RTP, printr-o abordare de tip NR (No Reference), neavând la dispoziție

în nodurile parcurse de flux semnalul sursă de referință. Cadrele multimedia care alcătuiesc payloadul RTP nu sunt decodate fiindcă nu sunt de interes din punct de vedere al detecției legăturilor congestionate.

Se calculează următoarele metrici obiective de calitate video, ca și în [Bar11b]:

- 1. Numărul de pachete pierdute** se calculează în fiecare moment în care se recepționează un nou pachet și indică numărul total de pachete care nu au ajuns la nodul curent, deși au fost trimise de către nodul sursă.
- 2. Rata de succes a transmisiei (SR – Success Ratio)** indică procentul de pachete recepționate cu succes dintr-un anumit flux. Rata de succes în momentul  $t$  are următoarea expresie:

$$SR(t) = \frac{N_r(t)}{N_{total}(t)} \times 100\% , \quad (4.1)$$

unde  $N_r(t)$  reprezintă numărul total de pachete recepționate până în momentul  $t$ , iar  $N_{total}(t)$  reprezintă numărul total de pachete trimise de către sursă.

- 3. Magnitudinea pierderilor** exprimă numărul de pachete pierdute la fiecare eveniment de pierdere. Fiecărui pachet recepționat  $i$  se atribuie o astfel de magnitudine, indicând numărul de pachete care lipsesc între acesta și pachetul anterior. O magnitudine cu valoarea 0 înseamnă că nu a avut loc un eveniment de pierdere.
- 4. Numărul de discontinuități** contorizează numărul de evenimente de pierdere, indicând frecvența pierderilor de pachete RTP.
- 5. Variația întârzierii inter-pachet (jitter)** se măsoară prin corelarea timestampului din antetul RTP cu timpul de sosire a pachetelor. Jitterul se calculează la fiecare recepție a unui nou pachet  $i$ , aplicând formula:

$$J(i)[s] = J(i - 1) + (|D(i - 1, i)| - J(i - 1))/16[s] . \quad (4.2)$$

unde  $D$  este echivalent cu diferența timpului relativ de tranziție (diferența dintre timestampul RTP al unui pachet și timpul de sosire la receptor) a două pachete.  $D$  pentru două pachete  $i$  și  $j$  se calculează în felul următor:

$$D(i, j)[s] = (R_j - R_i) - (S_j - S_i) = (R_j - S_j) - (R_i - S_i) , \quad (4.3)$$

unde  $S_i$  este timestampul RTP pentru pachetul  $i$ , exprimat în unități de timp, iar  $R_i$  este timpul de sosire al pachetului  $i$ . Pentru a exprima timestampul RTP în secunde, se împarte valoarea acestuia cu frecvența de eșantionare corespunzătoare tipului de payload transportat (8000 Hz pentru majoritatea codecurilor audio, respectiv 90000 Hz pentru codecuri video).

## 4.2.2 Implementarea instrumentului de monitorizare a metricilor VQ

Limbajul de programare folosit pentru implementarea practică a instrumentului de monitorizare a metricilor VQ este C++ sub Linux. S-au utilizat facilități de multi-threading și networking oferite de cadrul de lucru Qt. Aplicația poartă denumirea `RTPsniffer` și folosește biblioteca open-source `libpcap` care permite analiza pachetelor pe un sistem Linux.

Arhitectura internă a aplicației este ilustrată în Figura 4.1. Există două fire principale de execuție care controlează pornirea și oprirea aplicației, un thread de captură care urmărește traficul de interes și un fir de execuție responsabil pentru calcularea metricilor VQ și salvarea acestora într-un fișier text.

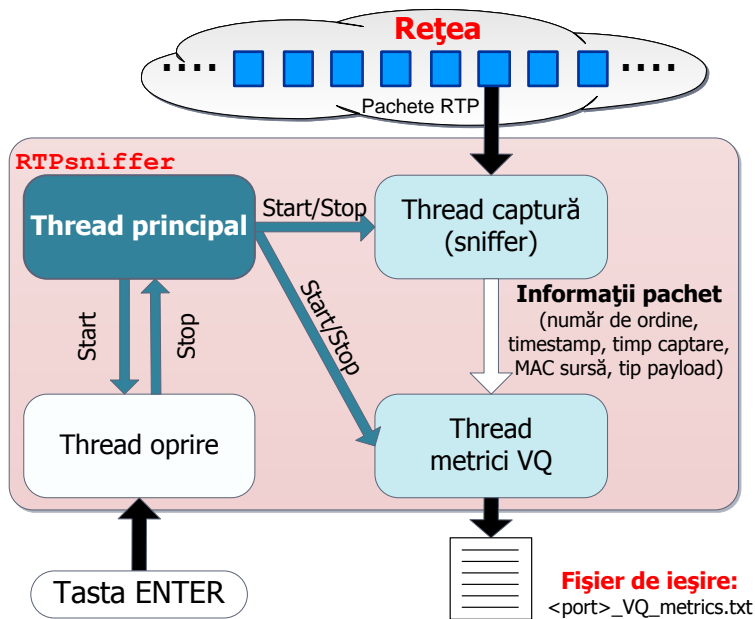


Figura 4.1 Structura internă a aplicației de monitorizare a metricilor VQ

Aplicația poate fi pornită pe o mașină Linux, introducând următoarea instrucțiune în linia de comandă de către un utilizator cu drepturi root:

```
# ./RTPsniffer <port> <interface> <protocol> <destIP> <packet_type>
```

Metricile sunt salvate în fișierul de ieșire denumit <port>\_VQ\_metrics.txt. Când se recepționează un nou pachet se vor salva următoarele informații în fișier: *a)* numărul de pachete pierdute, *b)* numărul de pachete recepționate, *c)* numărul de pachete trimise de către sursă, *d)* rata de succes, *e)* numărul de secvență RTP, *f)* magnitudinea pierderii, *g)* frecvența pierderilor (numărul de discontinuități), *h)* jitterul, *i)* timpul de captură, *j)* timestampul RTP și *k)* adresa MAC sursă.

### 4.2.3 Ilustrarea detecției congestiei prin evaluarea metricilor VQ

Figura 4.2 prezintă scenariul utilizat pentru ilustrarea detecției congestiei prin intermediul metricilor de calitate ale transmisiei video. Legăturile dintre routere sunt de tip FE (Fast Ethernet), având o rată de transfer teoretică de 100 Mbps.

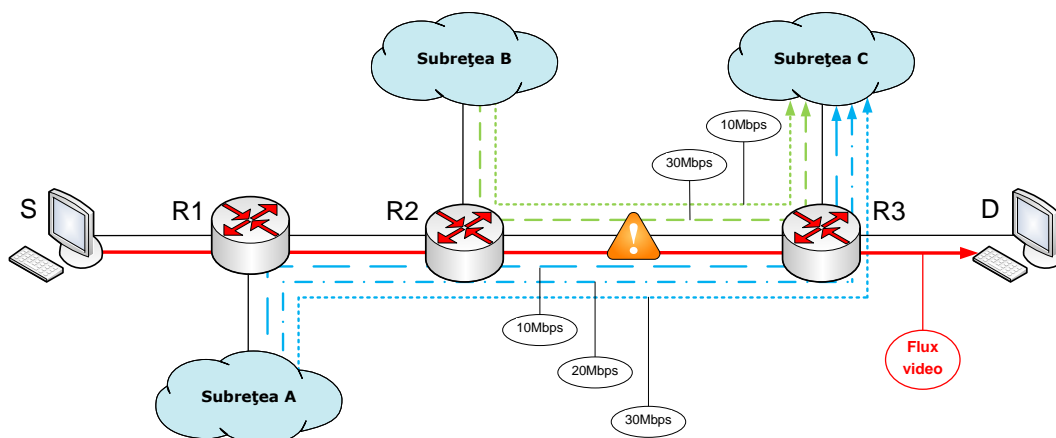


Figura 4.2 Scenariu pentru ilustrarea detecției congestiei prin evaluarea metricilor VQ

Între nodul sursă și nodul destinație se trimite un flux video al cărui debit variază în intervalul [1, 2] Mbps. Între subrețelele A, B și C se pornesc diferite transmisii odată la fiecare 20 de secunde, suma totală a ratei de transfer utilizate ajungând de 100 Mbps în momentul 1'40". În acest fel, legătura R2–R3 (folosită de către toate fluxurile) va deveni congestionată. Se monitorizează pe fiecare router metricile VQ corespunzătoare fluxului transmis între S și D în vederea identificării momentului de apariție a congestiei pe legătura R2–R3.

Figura 4.3 prezintă evoluția ratei de succes a transmisiei și a magnitudinii pierderilor, măsurate pe nodul R3 pe durata experimentului. Ambele metrici indică în același moment apariția congestiei: rata de succes începe să scadă, iar magnitudinea pierderilor prezintă valori nenule.

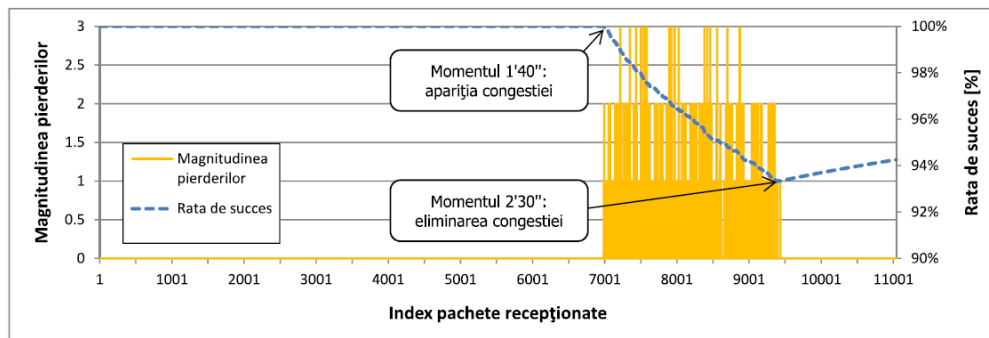


Figura 4.3 Magnitudinea pierderilor și rata de succes pe R3

Figura 4.4 ilustrează evoluția numărului de pachete pierdute și a discontinuităților, respectiv diferența de jitter măsurat pe R1 și R3. Apariția congestiei determină creșterea continuă a acestora.

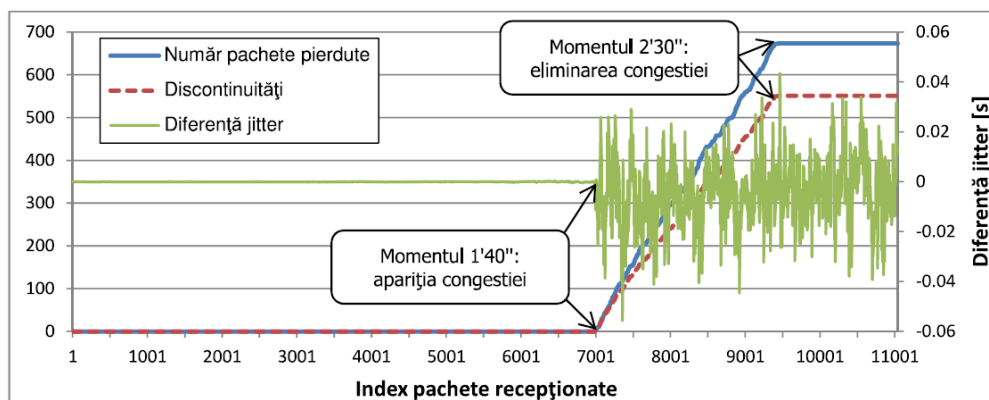


Figura 4.4 Pierderi de pachete pe R3

Pe baza acestui experiment putem trage concluzia că detecția congestiei prin monitorizarea metricilor de calitate video este o soluție fiabilă și simplă. Metrica VQ cea mai importantă din acest punct de vedere este evoluția numărului de pachete pierdute. Evenimentele de pierdere datorate congestiei pot fi caracterizate prin evaluarea simultană a magnitudinii și a frecvenței pierderilor apărute într-un anumit interval de timp, de exemplu:

- o magnitudine și o frecvență mică indică *pierderi împrăștiate*;
- o magnitudine ridicată combinată cu o frecvență mică descrie *pierderi în rafale (bursty)*;
- o magnitudine și o frecvență ridicată pe durata unui interval reprezintă *pierderi continue*.

## 4.3 Detecția congestiei prin evaluarea ratei de transfer disponibile

Deși congestia apare din cauza eliminării pachetelor din cozile routerului, fără a le trimite la destinație, efectul se manifestă pe legăturile rețelei. Din acest motiv, cel mai important indicator al apariției congestiei pe o anumită legătură este evoluția ratei de transfer disponibile (ATR – Available Transfer Rate). Aceasta poate fi măsurată la substratul MAC (Media Access Control), la stratul rețea, la stratul transport sau la stratul aplicație.

### 4.3.1 Indicatori statistici SMA și SD

Indicatorii statistici folosiți pentru detecția congestiei în cadrul acestei lucrări sunt *media mobilă simplă* (SMA – Simple Moving Average) și *deviația standard* (SD – Standard Deviation) a datelor măsurate, ambele calculate pentru un interval de timp prestabilit. Aceștia sunt necesari în vederea eliminării efectelor fluctuației valorilor măsurate: măsurătorile care oscilează în jurul unui prag stabilit pot genera alarme false pozitive și negative.

Prin media mobilă simplă SMA se calculează la fiecare interval de timp media aritmetică a ultimelor  $N$  intervale de timp, fiecare valoarea fiind considerată cu aceeași pondere:

$$SMA(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} x(t-i) . \quad (4.4)$$

Celălalt indicator statistic care poate fi folosit este deviația standard. Prin intermediul acesteia se poate detecta variația ratei disponibile, cauzată de modificarea caracteristicilor transmisiei, respectiv apariția sau terminarea unor fluxuri:

$$\sigma(t) = \sqrt{Var(X)} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} (x(t-i) - SMA(t))^2} . \quad (4.5)$$

Se consideră că legătura este congestionată dacă media mobilă simplă a parametrului ATR scade sub un anumit prag fix sau variabil. Pe baza experimentelor s-a constatat că un prag fixat la 5% din valoarea maximă disponibilă pe legătură permite o detecție rapidă a congestiei.

### 4.3.2 Ilustrarea detecției congestiei prin evaluarea ATR

Figura 4.5 arată scenariul prin care se demonstrează detecția congestiei prin evaluarea indicatorilor statistici aferenți ratei de transfer disponibile. Intervalul pentru care se calculează indicatorii statistici este de 10 secunde, iar valorile ATR sunt măsurate la nivelul substratului MAC.

În Figura 4.6 se prezintă evoluția mediei mobile și a deviației standard pentru parametrul ATR, măsurat pe legătura R2–R3. Se poate identifica nu numai congestia, ci și schimbările în condițiile de trafic (pornirea/oprirea diferitelor transmisii). Pornirea fiecărui nou flux este indicată de deviația standard care prezintă un vârf, iar media mobilă a ATR se reduce. Figura arată și evoluția indicatorilor statistici a întârzierii. Observăm că și acest parametru poate oferi informații utile referitoare la congestia de pe legătură. În cazul în care rata trimisă pe legătura R2–R3 se apropie de rata maximă posibilă (după momentul 1'40"), întârzierea de pe legătură începe să crească. După ce apare supraîncărcarea legăturii, latența crește semnificativ, ajungând la 6 ms.

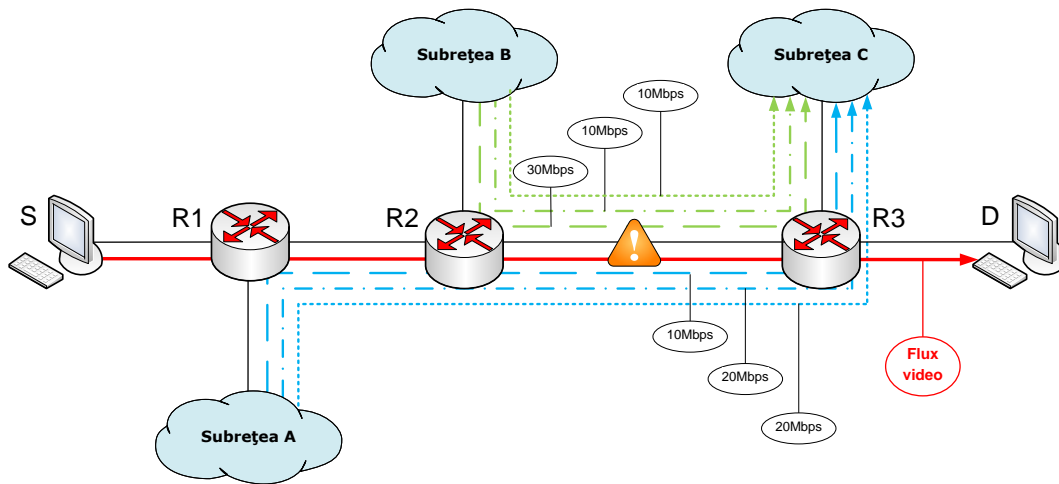


Figura 4.5 Scenariu pentru ilustrarea detecției congestiei prin evaluarea ATR

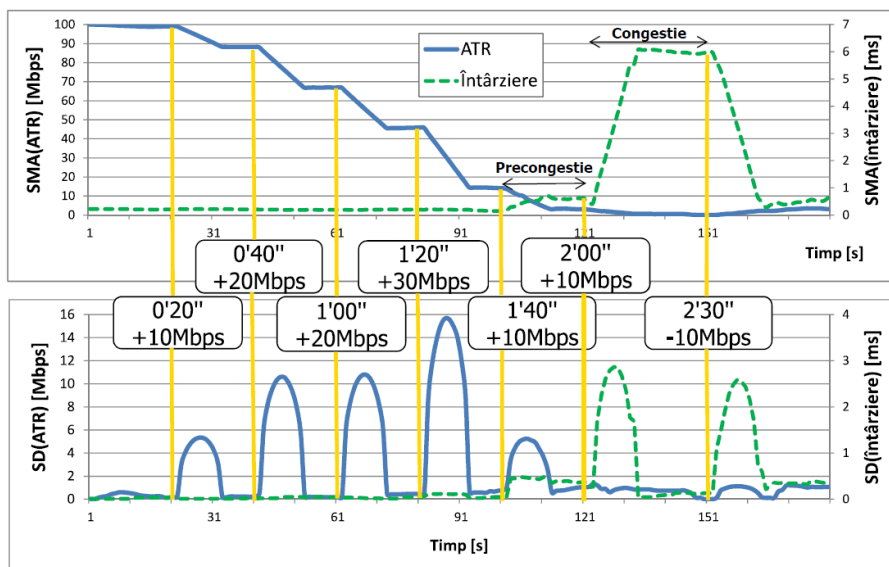


Figura 4.6 Rata de transfer disponibilă pe legătura R2–R3

## 4.4 Concluzii

Noutatea abordării bazate pe calitatea fluxurilor video RTP constă în faptul că se monitorizează metrici VQ pe fiecare router, nu doar la nodul destinație (*feedback* doar pentru nodul sursă la care se răspunde printr-un debit mai redus). O altă diferență față de soluții asemănătoare este calculul metricilor la nivelul protocolului RTP, și nu la nivel de cadre MPEG sau pachete MPEG TS (Transport Stream). A doua metodă realizează detecția congestiei pe baza monitorizării ratei de transfer disponibile pe legături. Noutatea abordării constă în faptul că se realizează măsurători la nivelul substratului MAC, iar congestia este identificată folosind indicatori statistici.

Dezvoltările ulterioare ale instrumentului de detecție a congestiei pe baza calității video vizează combinarea metricilor VQ monitorizate într-o singură metrică compozită care oferă o imagine de ansamblu asupra transmisiei. Momentan se presupune că există un modul care identifică fluxurile video din rețea. În viitor acest lucru s-ar putea realiza cu ajutorul protocolului IPFIX, după ce se va termina standardizarea acestuia și va fi disponibilă o implementare finală sub Linux. În plus, s-ar putea realiza o monitorizare VQ care nu depinde de protocolul RTP.

## Capitolul 5

# Proiectarea și implementarea preliminară a unui sistem de management al rutării

### 5.1 Motivație

Scopul unui sistem de management al rutării este monitorizarea utilizării resurselor rețelei și ajustarea adaptivă a parametrilor protocolului de rutare în funcție de condițiile de trafic. Sistemul trebuie să alcătuiască o parte intrinsecă a rețelei (inclusiv încă din faza de proiectare în interiorul protocoalelor de comunicare) și să fie caracterizat de *situation-awareness*, scalabilitate, robustețe, funcții autonome și capacitate de învățare. Prin conștientizarea stării rețelei, sistemul devine capabil să se adapteze în funcție de schimbarea condițiilor de utilizare.

Proiectarea implică definirea întregii arhitecturi de management, aceasta fiind compusă din: a) *componenta de comunicare* care descrie schimbul de mesaje, b) *componenta funcțională* care precizează funcțiile/serviciile disponibile și c) *componenta informațională* prin care se abstractizează informația de management. Paradigma de management aplicată este una distribuită, cu delegare verticală și orizontală, caracterizată de o comunicare bazată pe evenimente. Funcțiile FCAPS tratate sunt cele referitoare la managementul defectelor, al configurațiilor și al performanțelor.

### 5.2 Proiectarea sistemului de management al rutării, conștient de starea rețelei

Obiectivul acestui sistem autonom este includerea procesului de monitorizare ca parte integrată în arhitectura de rețea. Ideea de bază este separarea procesului de monitorizare/actualizare a stării rețelei de procesul de rutare în sine, ilustrată în Figura 5.1. Aceasta presupune o abordare de tip clean-slate, regândind întregul proces de rutare. Sistemul de management preia anumite funcții care în mod tradițional aparțin de protocolul de rutare: comunicarea cu nodurile vecine, descoperirea topologiei, verificarea conectivității, efectuarea de măsurători etc. Astfel, rutarea se poate concentra pe calcularea căilor și întreținerea tabelor de rutare.

Se monitorizează rata de transfer disponibilă și latența pe legături, respectiv pierderile de pachete RTP, evaluând situația curentă prin mecanisme de percepție, deducție și predicție. Algoritmul de rutare primește informații referitoare la topologia rețelei și starea legăturilor, fără a se impune modul de determinare a căilor și metrica de rutare folosită. Informațiile care descriu starea curentă devin reutilizabile și nu depind de un anumit algoritm de rutare. Managementul poate alege între activarea diferiților algoritmi de rutare în funcție de caracteristicile rețelei și ale traficului.



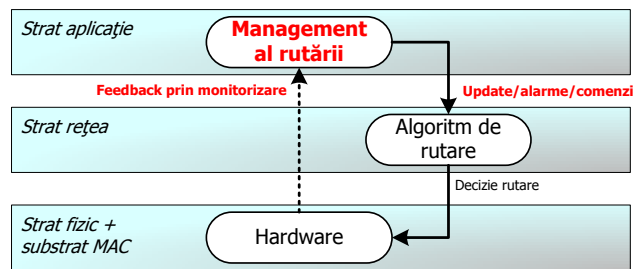


Figura 5.1 Separarea monitorizării de rutarea propriu-zisă

### 5.2.1 Proiectarea entităților de management

Sunt propuse două tipuri de entități de management:

- *Entitatea de management local* (LME – Local Management Entity) se ocupă de aspectele locale ale gestionării.
- *Entitatea de management de domeniu* (DME – Domain Management Entity) este responsabilă de probleme care necesită o viziune globală asupra rețelei, gestionând entitățile LME.

Paradigma de management distribuit implică o funcționare asincronă a entităților, găsim soluția la problemele de rutare prin cooperare.

#### 5.2.1.1 Entitatea de management local

Entitatea de management local captează starea locală a rețelei prin comunicarea cu vecinii, fiind responsabilă de observarea, colectarea și interpretarea datelor. Pe fiecare nod din rețea există o astfel de entitate. LME conține din trei module principale (vezi Figura 5.2):

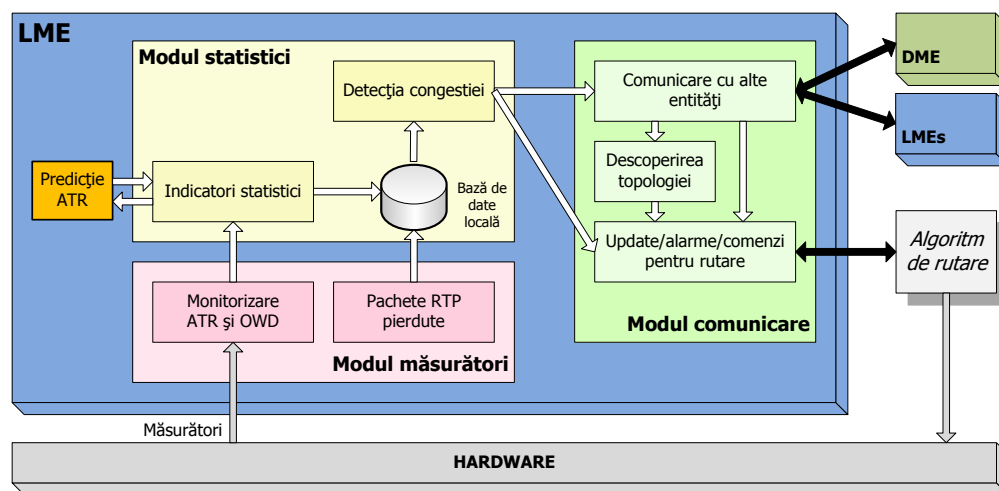


Figura 5.2 Schema bloc a entității de management local LME

**A. Modulul de măsurători** este responsabil de comunicarea cu hardware-ul, pornind măsurătorile de rată de transfer disponibilă (ATR – Available Transfer Rate) și latență (OWD – One Way Delay) pe fiecare legătură unidirecțională de intrare (*inbound*), respectiv de pachete multimedia pierdute. Pierderile de pachete RTP se detectează la stratul aplicație, iar monitorizarea ATR și OWD se realizează la nivelul substratului MAC. Aceste informații se folosesc pentru luarea deciziilor de rutare, realizându-se un control adaptiv de tip cross-layer.



- B. Modulul de statistici** calculează media mobilă simplă și deviația pentru ATR și întârziere, respectiv le salvează într-o bază de date locală. Din înregistrările colectate în baza de date se extrage starea locală curentă cu scopul de a detecta probleme de rutare (congestia etc.)
- C. Modulul de comunicare** asigură comunicarea cu alte entități prin mesaje XML, respectiv comunicarea cu algoritmul de rutare prin intermediul unor fișiere de tip text. Funcțiile îndeplinite de acest modul sunt: *a)* identificarea nodurilor vecine în vederea pornirii măsurătorilor ATR și OWD, *b)* descoperirea topologiei, *c)* schimbul de mesaje prin care se asigură conștientizarea stării și *d)* trimiterea unor comenzi, alarme și actualizări către algoritmul de rutare.

Figura 5.3 ilustrează organigrama de funcționare a unei entități LME, prezentând doar capacitățile de bază ale acestuia, fără a detalia modul în care se realizează funcțiile individuale.

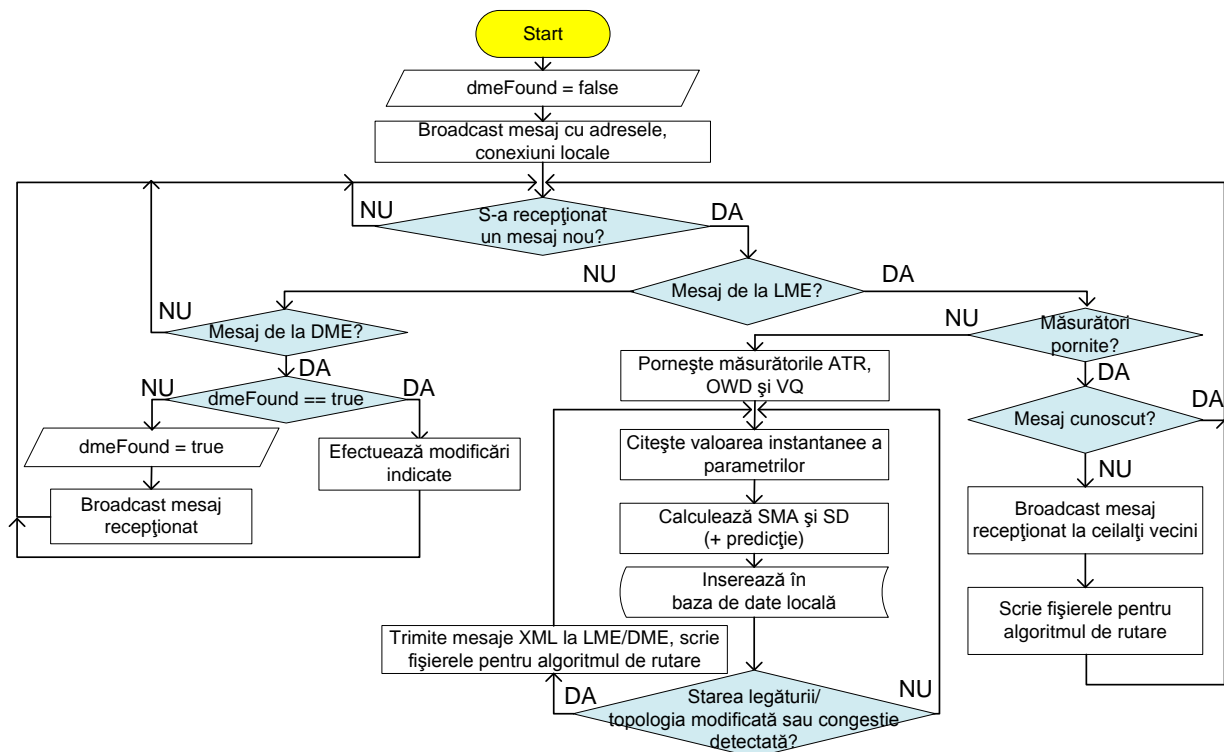


Figura 5.3 Schema logică simplificată a entității LME

### 5.2.1.2 Entitatea de management de domeniu

O entitate de management de domeniu poate fi localizată pe oricare dintre noduri și se ocupă de problemele care necesită o viziune globală asupra rețelei, precum schimbarea algoritmului de rutare sau activarea unor soluții alternative de rutare. Aceasta implementează un management distribuit prin delegare verticală, necesară deoarece luarea anumitor decizii globale de rutare este dificil de realizat doar prin cooperare și delegare orizontală. Entitatea DME poate fi localizată pe oricare dintre nodurile domeniului administrat. Într-un domeniu de rutare definit există un singur DME. Figura 5.4(a) prezintă modulele care fac parte din structura unui DME, iar Figura 5.4(b) ilustrează organigrama simplificată a funcționării DME.

- A. Modulul de comunicare** Permite interacționarea cu entitățile LME în vederea conștientizării stării rețelei. Se anunță prezența DME, trimițând mesaje UDP la entitățile locale. Se îndeplinesc funcțiile unui server TCP, gestionând conexiunile client și trimițând mesaje proprii.

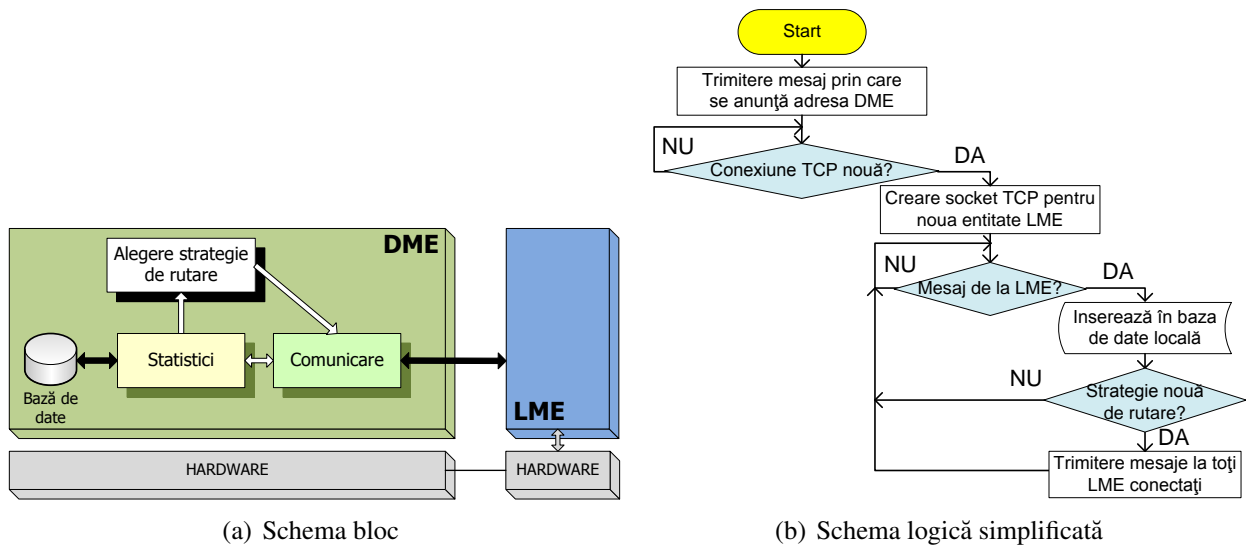


Figura 5.4 Entitatea de management de domeniu DME

- B. **Modulul de statistici** folosește o bază de date locală în care se salvează informațiile despre legăturile rețelei, trimise de către entitățile LME.
- C. **Modulul de alegere a strategiei de rutare** este responsabil de alegerea strategiei de rutare aplicate în întregul domeniu. Pe baza stării rețelei, în cazul în care se identifică schimbări care necesită reevaluarea configurațiilor curente, se va indica noua strategie de rutare care trebuie activată pe noduri.

### 5.2.1.3 Comunicarea dintre entități

În Figura 5.5 se ilustrează modul în care comunică diferitele entități de management.

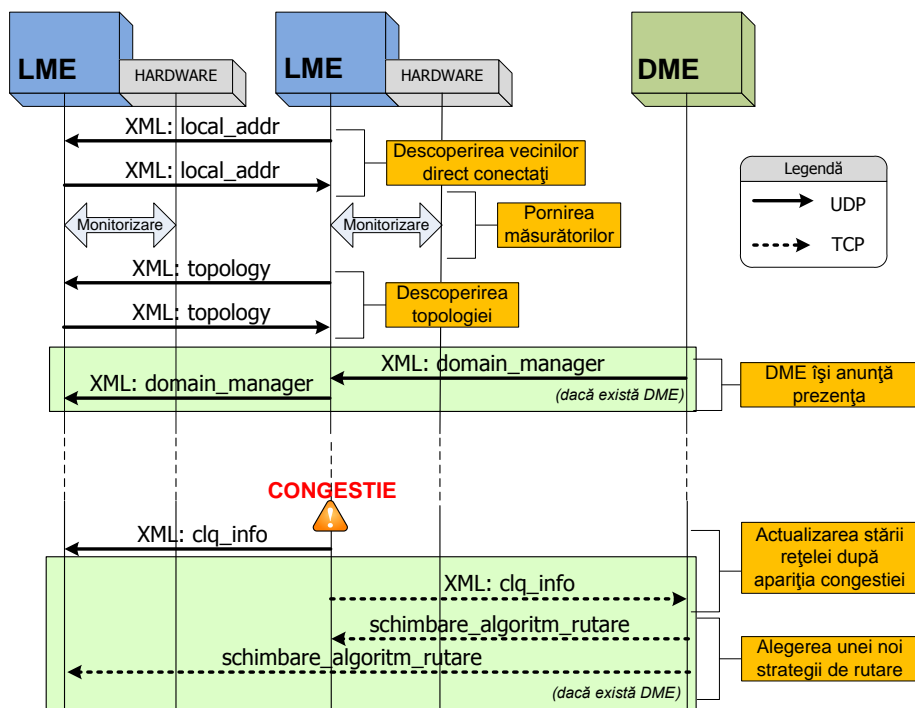


Figura 5.5 Comunicarea dintre entitățile LME și DME

Mesajele XML prin UDP sunt trimise printr-un mecanism de *flooding* controlat: în cazul în care mesajul recepționat conține informații noi va fi trimis către celelalte noduri vecine, evitând retransmiterea către nodul de la care s-a recepționat. Dacă informațiile au fost deja recepționate într-un moment de timp anterior, mesajul va fi ignorat.

## 5.2.2 Proiectarea bazelor de date

Atât LME, cât și DME salvează parametrii care reflectă starea rețelei în baze de date relaționale. Baza de date utilizată de către LME este prezentată în Figura 5.6 și poartă denumirea *Local\_Statistics*. Baza de date corespunzătoare DME este de structură asemănătoare, fiind denumită *Network\_Statistics*. Singura diferență este lipsa tabelului *Data\_Table*.

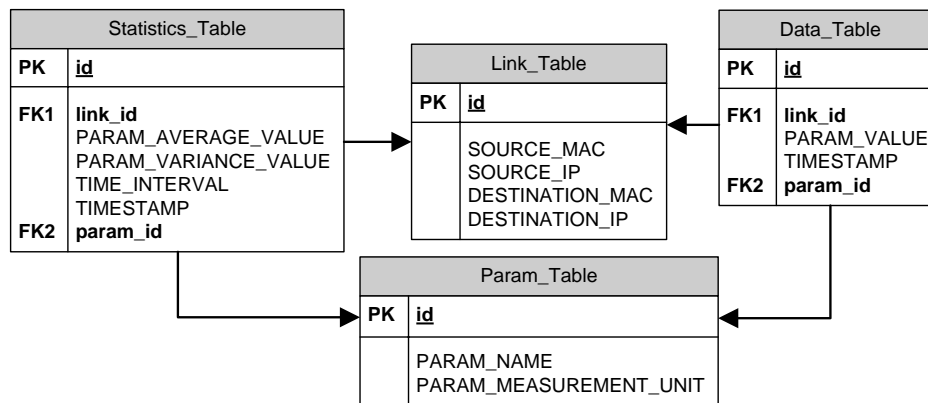


Figura 5.6 Baza de date *Local\_Statistics*

## 5.2.3 Definirea formatului mesajelor XML

Diferitele entități de management comunică între ele prin transmiterea unor mesaje XML. S-a ales o metodă de comunicare prin mesaje XML deoarece oferă mai multe avantaje: *a)* este extensibilă; *b)* se poate verifica corectitudinea; *c)* datele pot fi reprezentate într-un mod independent de aplicație; *d)* este simplu și accesibil. Descrierea structurii mesajelor de management bazate pe XML s-a realizat folosind XSD (XML Schema Definition). Se propun patru tipuri de mesaje XML care vor fi folosite în sistemul de management al rutării:

- 1) mesaj XML pentru descoperirea vecinilor direct conectați *local\_addr*;
- 2) mesaj XML pentru anunțarea prezenței DME *domain\_manager*;
- 3) mesaj XML pentru descoperirea topologiei *topology*;
- 4) mesaj XML cu informații statistice referitoare la parametrii monitorizați *clq\_info*.

## 5.3 Implementarea preliminară a sistemului propus

Pentru realizarea practică a aplicațiilor de management s-a ales limbajul de programare C++ sub sistemul de operare Linux folosind mediul Eclipse CDT (C/C++ Development Tooling). S-au utilizat facilitățile oferite de cadrul de lucru Qt, precum: parsarea XML, gestionarea firelor de execuție, suport pentru comunicație între procese, suport pentru comunicații prin TCP și UDP, tratarea fișierelor etc. Pentru stocarea informațiilor în baze de date s-a folosit MySQL prin intermediul conectorului *mysql++* care reprezintă un wrapper C++ pentru MySQL C API (Application Programming

Interface). Entitatea de management local poate fi pornită executând următoarea comandă de către un utilizator cu drept de administrator:

```
# ./LocalMgmtEntity
```

Fișierul de configurare al aplicației `LocalMgmtEntity` este un fișier de tip text generat în momentul în care se pornește aplicația, în cazul în care nu există în prealabil. Calea de stocare a fișierului este:

```
$HOME/.config/NetworkStatistics/LocalMgmtEntity.conf
```

unde `$HOME` este variabila de mediu care definește calea spre directorul „home” al unui utilizator curent. Fișierul conține informații legate de setările aplicației sub formă de text, permițând modificarea valorilor implicite într-un mod simplu, fără a fi necesară recompilarea codului sursă.

Entitatea de management de domeniu se pornește prin comanda:

```
# ./DomainMgmtEntity
```

Fișierul de configurare al aplicației `DomainMgmtEntity` este un fișier de tip text, salvat în locația:

```
$HOME/.config/NetworkStatistics/DomainMgmtEntity.conf
```

## 5.4 Concluzii

În acest capitol s-a descris proiectarea și implemetarea preliminară a unei soluții autonome de management al rutării. Au fost definite și implementate două tipuri de entități de management: LME (entitate de management local) și DME (entitate de management de domeniu). Principalele funcții ale unei entități LME sunt legate de gestionarea locală: *a*) monitorizarea ATR și a întârzierii pe legăturile de intrare; *b*) calcularea indicatorilor statistici; *c*) extragerea situației curente locale din informațiile colectate; *d*) comunicarea cu alte entități LME și DME cu scopul de a distribui informațiile referitoare la starea rețelei. O entitate de management de domeniu interacționează cu mai mulți LME. Existența acestuia se motivează prin nevoia de a efectua de către acesta funcții care depășesc posibilitățile LME.

Sistemul de management realizează de fapt niște recomandări privind procesul de rutare pe baza evaluării stării rețelei. Sistemul poate folosi orice algoritm de rutare care implementează o interfață compatibilă. Nu se impune metrica de rutare folosită și nici metoda utilizată pentru calcularea căilor. Algoritmului de rutare se oferă date primare (ATR și OWD pe fiecare legătură unidirecțională), lăsând pe seama acestuia calcularea metricilor compozite. Dacă un algoritm de rutare nu reușește eliminarea congestiei, se prevede folosirea unei strategii diferite de rutare.

Funcționarea entităților este dedicată managementului rutării, dar acestea ar putea fi folosite și pentru alte aspecte ale managementului. În prezent, se monitorizează doar acei parametri care sunt importanți din punct de vedere al deciziilor de dirijare a pachetelor. Dezvoltările ulterioare intenționează să completeze funcționalitățile sistemului, îndeplinind toate funcțiile FCAPS.

În prezent, pentru simplitate s-a ales comunicarea prin UDP între entități locale și prin TCP cu entitatea de management de domeniu. Din considerente de securitate, dezvoltările viitoare prevăd trimiterea mesajelor XML folosind SSH (Secure Shell)/TCP astfel încât să fie asigurată atât recepționarea mesajelor, cât și securitatea comunicației.

Dezvoltările ulterioare prevăd: *a*) realizarea adaptivă a măsurătorilor de către LME, în funcție de condițiile de trafic; *b*) evaluarea diferitelor tipuri de indicatori statistici, de exemplu calculând valoarea medie astfel încât valorile recente să fie considerate cu o pondere mai mare; *c*) dezvoltarea mecanismului de comunicare între entități DME; *d*) adaptarea dinamică a pragului care indică modificarea condițiilor de trafic și apariția congestiei etc.

## Capitolul 6

# Managementul congestiei prin activarea tehnicii Network Coding

### 6.1 Motivație

Codarea traficului în rețea reprezintă o metodă prin care rutarea distribuită se combină cu operații algebrice aplicate asupra pachetelor recepționate. Network Coding (NC) poate fi privit ca o soluție alternativă la rutarea *conștientă de QoS* (QoS-aware), folosită atunci când rerutarea traficului nu este posibilă din anumite motive. Prin aceasta se încearcă păstrarea performanțelor serviciilor curente din rețea, în ciuda congestiei care nu poate fi eliminată. Paradigma NC se bucură de un interes tot mai mare în teoria informației și a codării, în rețelistică, în comunicațiile wireless, criptografie [Kis11]. Conform [Che11], cele mai importante avantaje ale tehnicilor de codare a traficului în rețea sunt robustețea la pierderi de pachete și la defecțiuni ale nodurilor/legăturilor.

Pornind de la această observație, s-a luat în calcul folosirea tehnicii NC pentru controlul congestiei în nodurile rețelei. Primul pas a fost combinarea în lucrarea [Pol09] a unei monitorizări de rată de transfer în timp real cu simularea în OMNeT++ a codării în rețea, considerând o transmisie multicast de tip punct-la-multi-punct. Rezultatele experimentale promițătoare ne-au motivat să dezvoltăm abordarea sub forma unei implementări reale. Sistemul de management al rutării este folosit pentru activarea/dezactivarea adaptivă a unei scheme de codare de tip Network Coding, implementând un mecanism de control al congestiei pe baza conștientizării stării rețelei, după cum a fost prezentat în [Rus10a] și [Cor11].

### 6.2 Activarea NC prin sistemul de auto-management

Cea mai simplă rețea în care se poate aplica tehnica NC este topologia de tip fluture, prezentată în testbedul din Figura 6.1. Prin NC se realizează transmisia combinată prin XOR (eXclusive OR) a două fluxuri (A și B) care sunt trimise „în cruce”, adică pe rute care împărtășesc o legătură comună.

Dacă apare o congestie pe legătura comună R5–R6, aceasta poate fi controlată în R5 printr-o codare XOR a pachetelor din cele două fluxuri. Pentru a fi posibilă decodarea, se vor transmite fluxurile și pe legături suplimentare: R1 va trimite către R3 și R2 spre R4, iar R6 va transmite fluxul codat recepționat de la R5 atât la R3, cât și la R4. Deoarece NC presupune o dublare a resurselor ocupate pe legăturile necongestionate, acesta va fi activat doar dacă aduce îmbunătățiri ale performanței. Pentru aceasta sistemul de management trebuie să ofere funcționalitățile:

1. **Identificarea structurii de tip fluture:** se bazează pe descoperirea topologiei. Această funcționalitate presupune determinarea rolurilor pe care le ia fiecare nod în parte.
2. **Monitorizarea ratei de transfer pe legăturile implicate:** pe baza informațiilor statistice referitoare la rata disponibilă și utilizată pe legături se ia decizia dacă tehnica NC *poate fi*

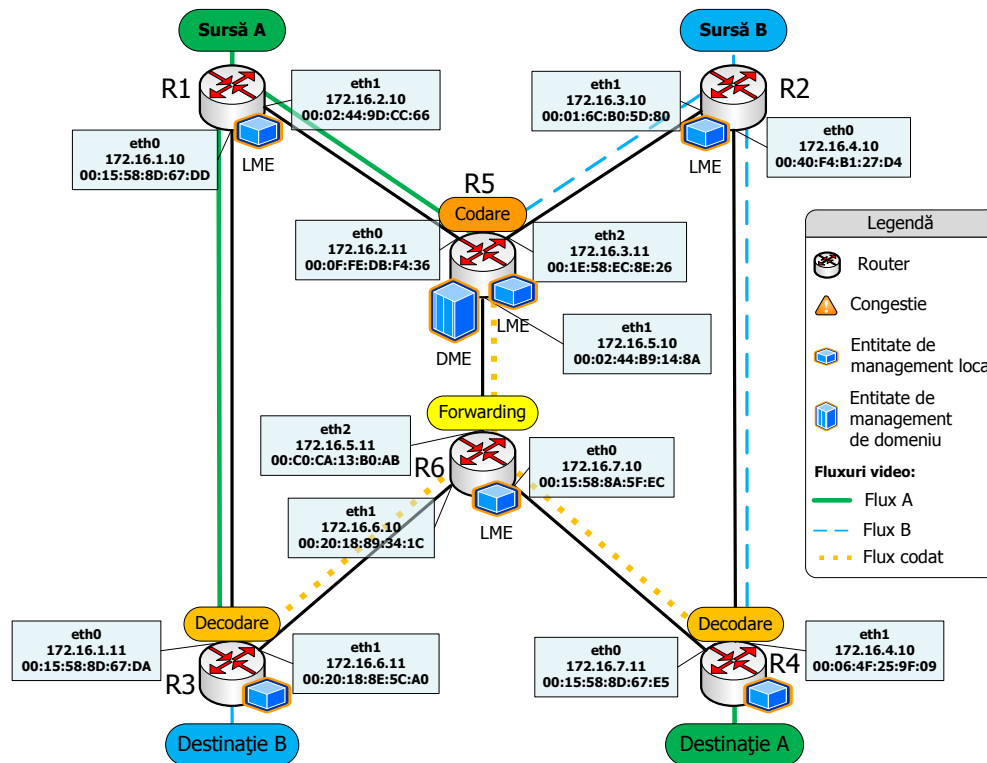


Figura 6.1 Testbed NC – topologia fluture

activată. Trebuie îndeplinite condițiile:

- Rata de transfer disponibilă pe legătura R5–R6 trebuie să fie suficientă pentru a transmite fluxul cu debitul cel mai mare (dintre cele două streamuri).
- Rata de transfer disponibilă (ATR) pe legăturile R1–R3 și R2–R4 trebuie să fie mai mare decât debitul (D) necesar fluxului transmis:

$$\begin{aligned} ATR_{R1-R3} &> D_{R1-R5-R6-R4} \\ ATR_{R2-R4} &> D_{R2-R5-R6-R3} \end{aligned} \quad (6.1)$$

- Identificarea congestiei pe legătura comună:** între nodul de codare și nodul de forwarding. Această informație indică dacă *trebuie* activată NC.

Activarea NC are loc în momentul în care se detectează congestie pe R5–R6 (dacă ATR scade sub 5% din rata maximă), cu condiția ca pe R5–R6, R1–R3 și R2–R4 să putem transmite debitul corespunzător unui flux. Procesul de activare/dezactivare se bazează pe indicatorul SMA, calculat pentru intervale de 30 de secunde. Durata s-a ales pe baza unor experimente, sub forma unui compromis între detectarea din timp a congestiei și apariția unor alarme falsă.

Implementarea practică NC rezolvă în felul următor problemele legate de sincronizarea pachetelor și de dinamica fluxurilor transmise:

- Codarea are loc doar dacă sunt disponibile pachete corespunzătoare ambelor fluxuri, în caz contrar pachetele se transmit necodate.
- Dacă se trimit pachete de lungimi diferite, se codează doar partea comună.
- Dacă pachetele sunt codate, nodul de forwarding le va trimite către ambele noduri de decodare, în caz contrar vor fi trimise doar la destinatar.
- Pachetelor se adaugă un antet cu informații referitoare la codare, descris în [Rus10a].

Figura 6.2 ilustrează interacționarea dintre sistemul de management al rutării și aplicația Network Coding. Instrumentul utilizat pentru monitorizarea ratei a fost dezvoltat de către Bogdan Rus [Rus11], iar implementarea practică a programului de Network Coding a fost realizată de către Zsuzsanna Kiss [Kis11], implicând o rutare în stratul aplicație folosind transport UDP.

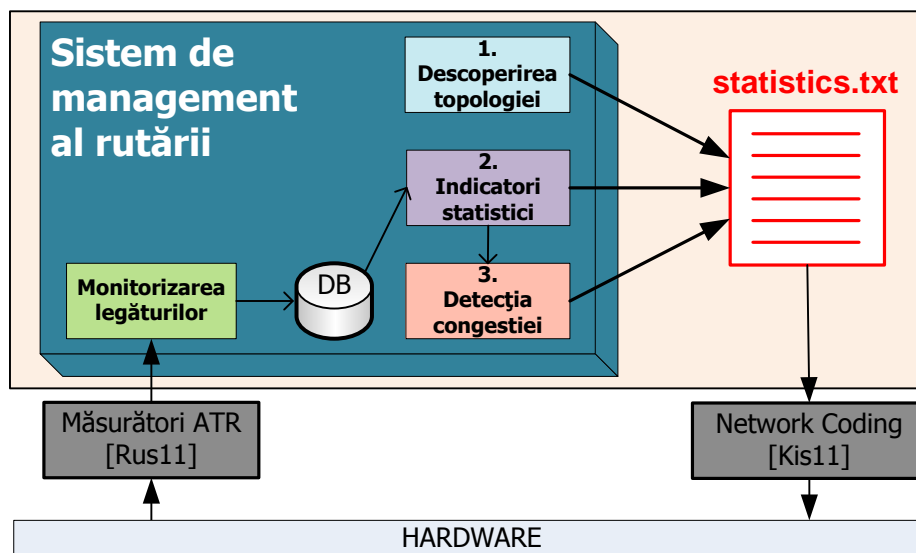


Figura 6.2 Schema de interacționare dintre sistemul de management și NC

## 6.3 Rezultate experimentale

Rețeaua de test este alcătuită din șase routere software care rulează pe calculatoare cu sistemul de operare Fedora. Interfețele dintre noduri sunt interfețe Fast Ethernet. Pe fiecare nod rulează o entitate LME, iar pe routerul R5 este pornită și o entitate DME.

În testele efectuate s-au transmis două fluxuri „în cruce”, rutate pe căi care conțin o legătură comună (R5–R6):

- fluxul A: de la nodul R1 la R4 pe ruta R1–R5–R6–R4, trimis la portul destinație 1234;
- fluxul B: de la nodul R2 la R3 pe ruta R2–R5–R6–R3, trimis la portul destinație 1236.

Fluxurile sunt streamuri video MPEG-4 de rezoluție QCIF (Quarter Common Intermediate Format) cu  $176 \times 144$  pixeli, având o rată de bit medie de 200 kbps și o durată de trei minute. Pentru transmiterea fluxurilor s-a folosit aplicația *VLC Media Player* (VLC – Video LAN Client) care permite realizarea de streaming multimedia RTP/UDP. Pentru a genera trafic pe legăturile din rețeaua de test, s-a apelat la instrumentul *iperf*.

Sunt analizate două scenarii pentru a demonstra capacitatea tehnicii NC de a îmbunătăți calitatea transmisiilor:

- Caz 1: *congestie fără activarea NC*;
- Caz 2: *congestie cu activarea NC*.

Se presupune că legătura R5–R6 este congestionată și tehnica NC este activată înainte de începerea transmisiei fluxurilor video. Astfel, pierderile de pachete care apar în Cazul 2 reflectă numai pierderile datorate managementului congestiei prin NC și nu includ pierderi asociate cu activarea NC după detecția congestiei. Congestia este introdusă astfel încât pe legătură să avem o rată de transfer disponibilă de 200 kbps, care ar permite doar transmiterea unui singur flux video.



### 6.3.1 Rezultate experimentale – Caz 1 (Fără activare NC)

Fluxurile sunt rutate în mod tradițional pe baza înregistrărilor din tabela de rutare a fiecărui router. Congestia de pe R5–R6 afectează amândouă fluxuri video (A și B) în egală măsură, efectele congestiei manifestându-se sub forma unor pierderi de pachete în mod continuu, pe întreaga durată a testului. Figura 6.3 ilustrează evoluția magnitudinii pierderilor pentru cele două fluxuri pe durata experimentului.

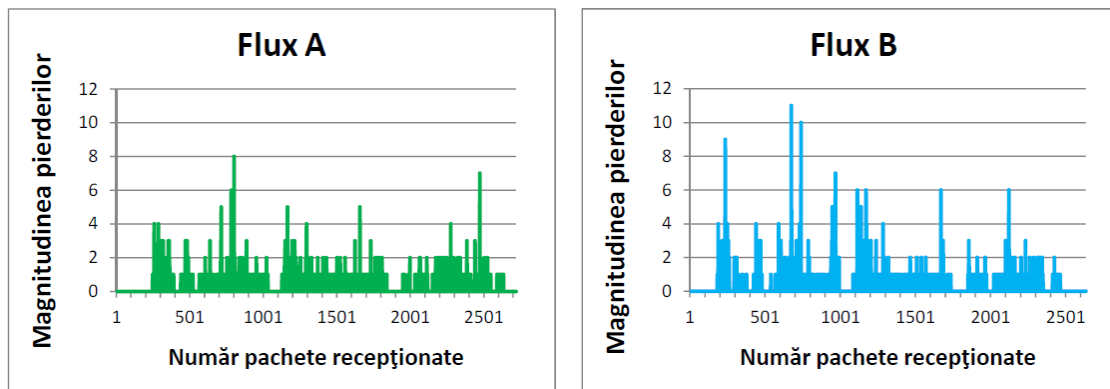


Figura 6.3 Magnitudinea pierderilor – fără activarea NC

Deși la destinație lipsesc doar aproximativ 20% din pachete, calitatea streamingului este inacceptabilă din punct de vedere al utilizatorului final, imaginea video fiind aproape de neînțeles.

### 6.3.2 Rezultate experimentale – Caz 2 (Activare NC)

Comanda de activare a schemei de codare în rețea este inițiată de către DME (dacă se detectează congestie și sunt îndeplinite condițiile (6.1)) și trimisă către toate LME. Fiecare LME informează aplicația NC care rulează pe nodul respectiv. Figura 6.4 ilustrează evoluția magnitudinii pierderilor pentru fluxurile video pe durata experimentului.

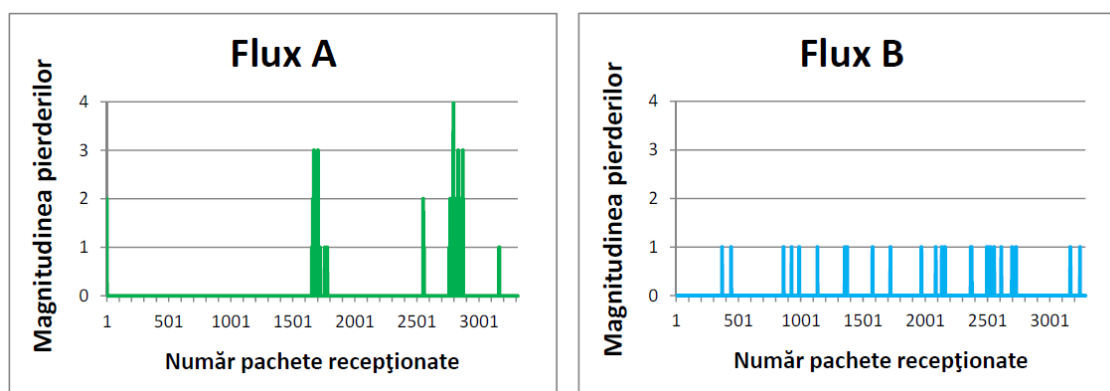


Figura 6.4 Magnitudinea pierderilor – cu activarea NC

Prezența pierderilor indică faptul că prin NC nu este posibilă eliminarea congestiei, ci doar reducerea efectelor negative ale acesteia. Magnitudinea și frecvența pierderilor este mai mică decât fără un astfel de control al congestiei. Pierderile de pachete apar deoarece debitul codat prezintă un caracter dinamic în funcție de evoluția fluxurilor video (*burstiness*), dar rata de transfer disponibilă pe legătură este limitată.



În Tabelul 6.1 sunt prezentați cei mai importanți parametri care indică calitatea celor două transmisii video. Observăm că rata de succes este semnificativ mai mare decât în cazul precedent. Calitatea experienței (QoE – Quality of Experience) la destinație este mult îmbunătățită, efectele congestiei fiind observate doar pentru perioade foarte scurte de timp, spre deosebire de Cazul 1 unde aproape toată transmisia era caracterizată de o calitate slabă (imagini înghețate/pixelate).

Tabela 6.1 Parametrii de calitate ai fluxurilor video recepționate – fără/cu activarea NC

	Fără activarea NC		Cu activarea NC	
	Flux A	Flux B	Flux A	Flux B
Numărul de pachete trimise	3402	3313	3402	3313
Numărul de pachete recepționate	2718	2634	3312	3287
Numărul de pachete pierdute	684	679	90	26
Procentul de pachete pierdute [%]	20.11%	20.5%	2.65%	0.79%
Magnitudinea medie a pierderilor	0.2517	0.2578	0.0271	0.0079
Magnitudinea maximă a pierderilor	8	11	4	1
Numărul de discontinuități	532	471	69	26
Rata de succes [%]	79.89%	79.5%	97.35%	99.21%

## 6.4 Concluzii

Pe baza testelor efectuate se poate trage concluzia că un sistem de management al rutării care este conștient de starea rețelei poate comanda activarea NC, asigurând astfel transmisii de calitate mai bună. Rezultatele demonstrează fezabilitatea abordării și permit evaluarea avantajelor și a dezavantajelor acestora într-un cadru realist. Deoarece codarea în rețea presupune foarte multe operații suplimentare (implicând atât resurse computaționale, cât și resurse ale legăturilor), aceasta trebuie activată doar în cazul în care nu există alte opțiuni pentru îmbunătățirea calității serviciilor. Deși Network Coding a fost testat într-o rețea cablată Ethernet, adevărata valoare a tehnicii se observă în cazul legăturilor fără fir.

Pe lângă avantajele oferite de NC, tehnica are și limitări semnificative deoarece trebuie îndeplinite simultan mai multe condiții: *a*) trebuie să existe o structură de tip fluture în rețea, *b*) trebuie să existe două fluxuri trimise în același moment „în cruce” (pentru a reduce semnalizările necesare decodării ideal ar fi dacă cele două transmisii ar avea caracteristici asemănătoare) și *c*) trebuie îndeplinite condițiile privind ATR pe legăturile implicate.

Un dezavantaj important al NC este faptul că nu reușește să elimine în totalitate pierderile de pachete fiindcă nu poate rezolva situația de congestie. Deși oferă o calitate mai bună a serviciilor, nu este o soluție optimală. Un alt dezavantaj al schemei de codare analizate este adusă de implementarea practică care permite doar o viteză redusă de procesare a pachetelor ceea ce limitează rezoluția imaginii video la QCIF ( $176 \times 144$ ).

O alternativă pentru managementul congestiei ar putea fi rerutarea la nivelul stratului rețea pe baza QoS, în loc de aplicarea NC în stratul aplicație. NC realizează o compresie a datelor, pe când rerutarea ar alege direct o nouă cale de rutare pentru ambele fluxuri, evitând legătura congestionată.

Dezvoltările ulterioare iau în calcul testarea soluției într-un mediu wireless sau eterogen. O altă dezvoltare viitoare a sistemului de management vizează identificarea de către entitatea DME a unor structuri de tip fluture de dimensiune mai mare, alcătuite din mai mult decât 6 noduri. În acest fel topologia considerată pentru codarea traficului s-ar putea adapta la arhitectura de rețea existentă.

# Capitolul 7

## Managementul congestiei prin rutare QoS-aware

### 7.1 Motivație

Inițial se credea că protocoalele adaptive de rutare, precum OSPF (Open Shortest Path First), pot reacționa la congestie. Ingineria eficientă a traficului nu este posibilă dacă protocolul de rutare nu ia în considerare condițiile de trafic în timp real [Med07].

În cazul OSPF conectivitatea legăturilor se verifică prin mesaje "Hello", dar această metodă nu garantează identificarea congestiei. Dacă mesajele lipsesc din cauza congestiei, rutele prin acel nod nu vor mai fi folosite. În plus, dacă un link oscilează în mod constant din cauza congestiei, dar din 4 mesaje "Hello" cel puțin unul ajunge la vecin, OSPF nu detectează că legătura este congestionată și apar pierderi.

În literatura se deosebesc două metode de control al congestiei: abordarea preventivă (se bazează pe rezervarea resurselor) sau abordarea reactivă (presupune eliminarea pachetelor din cozi sau reducerea ratei). Din punct de vedere al utilizatorului final, niciuna dintre soluții nu este optimală, afectând în special calitatea percepută (QoE) a transmisiilor multimedia. Nici modelele tradiționale de QoS precum IntServ (Integrated Services) sau DiffServ (Differentiated Services) nu pot garanta QoS nici într-o rețea mai puțin încărcată [Lip10]. Schemele de control al congestiei bazate pe indicatori ai încărcării s-au dovedit a îmbunătăți performanța rețelelor, în ceea ce privește gradul de utilizare, rata de pachete pierdute și întârzierea [Qaz11].

Se propune folosirea unui sistem de management pentru a îmbunătăți eficiența rutării. Ideea este de a trata problema congestiei la stratul rețea într-un mod simplu și eficient, prin rerutarea pachetelor. În [Rus10b] a fost simulată în OMNeT++ o versiune modificată a algoritmului Dijkstra, ținând cont de parametrii ATR, OWD și BER (Bit Error Rate) măsurați în timp real. În [Rus10c] se compară rutarea virtuală QoS-aware folosind Vyatta cu protocolul de rutare RIP (Routing Information Protocol), demonstrând avantajele oferite de utilizarea măsurătorilor de trafic pentru luarea deciziilor de rutare. Rezultatele obținute în [Rus10b] și [Rus10c] ne-au motivat să mergem mai departe și să folosim sistemul de management conștient de starea rețelei pentru a comanda recalcularea rutelor de către un algoritm de rutare cu metrică dinamică.

Scopul urmărit este echilibrarea încărcării rețelei și controlul congestiei prin redirecționarea transmisiilor în condiții nefavorabile de trafic, evitând căile congestionate prin aplicarea rutării QoS-aware. Rutare QoS-aware înseamnă că nu se calculează doar căile cele mai scurte, ci se ține cont și de traficul de pe căile respective. Rutele sunt alese astfel încât să prezinte cea mai mare rată de transfer disponibilă, fiind în același timp cele mai scurte (din punct de vedere al întârzierii, și nu din punct de vedere al numărului de hopuri). Punctele forte și limitările rutării QoS-aware sunt evaluate prin implementare practică într-o topologie de rețea reală.

## 7.2 Descrierea scenariului de testare

Arhitectura de rețea cu ajutorul căreia se demonstrează managementul congestiei prin rutare QoS-aware este ilustrată în Figura 7.1. Scenariul de testare implică o topologie alcătuită din șase routere și două stații gazdă. Routerele sunt de tip software și rulează pe calculatoare cu sistem de operare Fedora. Pe fiecare router rulează o entitate LME, iar pe R5 este și o entitate DME. În acest fel este posibilă monitorizarea stării tuturor legăturilor dintre noduri, respectiv distribuirea informațiilor în toată rețeaua, cu scopul de a fi utilizate pentru adaptarea funcționării și pentru îmbunătățirea performanțelor globale. Pe lângă DME și LME, pe fiecare mașină este instalată o aplicație de rutare QoS-aware care folosește o metrică dinamică pentru determinarea căilor, metrică ce depinde de parametrii legăturilor: rata de transfer disponibilă ATR și întârzierea.

În vederea demonstrării efectului benefic al rutării QoS-aware, s-a optat pentru trimiterea unui flux video MPEG-4 de rată variabilă (VBR – Variable Bit Rate) prin RTP/UDP/IP folosind aplicația VLC de la nodul sursă S la nodul destinație D, în condiții de congestie pe legătura R5–R4. Scenariu de test presupune introducerea congestiei după 1 minut de la pornirea testului.

## 7.3 Rezultate experimentale

Scopul testelor efectuate este acela de a demonstra capacitatea sistemului de management al rutării de a reduce efectele negative cauzate de legături congestionate prin oferirea de informații algoritmului de rutare despre starea rețelei. Se efectuează experimente pentru a compara performanța următoarelor două abordări din punct de vedere al răspunsului la apariția unei congestii:

- Caz 1: *protocolul de rutare OSPF*;
- Caz 2: *rutarea QoS-aware* comandată de către sistemul de management al rutării.

### 7.3.1 Rezultate experimentale – Caz 1 (OSPF)

În vederea evaluării protocolului OSPF pe mașini Linux se folosește pachetul software de rutare Quagga [Quagga], activând pe fiecare router daemonii `ospfd` și `zebra`. Figura 7.1 prezintă procesul de rutare a fluxului video realizat de către protocolul OSPF.

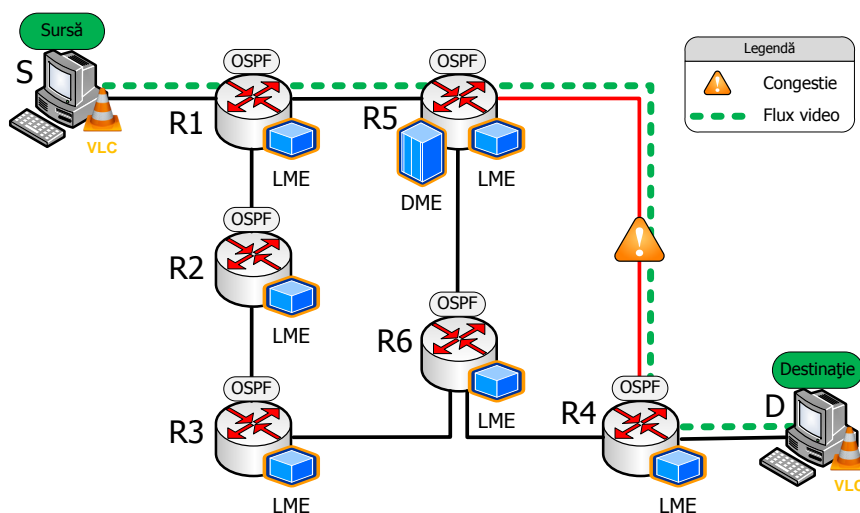


Figura 7.1 Testbed – Caz 1 (OSPF)

Ruta aleasă este S–R1–R5–R4–D. După ce se introduce congestie între R5 și R4, OSPF nu modifică ruta urmată de stream pentru că nu ia în considerare starea fizică a legăturilor. Drept urmare, se pierde 29.39% din totalul de pachete, calitatea transmisiei fiind foarte slabă la destinație.

### 7.3.2 Rezultate experimentale – Caz 2 (Rutare QoS-aware)

În Figura 7.2 se prezintă procesul de rutare QoS-aware, comandat de către sistemul de management al rutării. Conștientizarea stării presupune monitorizarea valorii medii pentru ATR și OWD, calculate pentru intervale de 10 secunde. Congestia de pe legătura afectată este detectată de către LME aflat pe R4, în momentul în care media mobilă a parametrului ATR scade sub 5% din rata nominală maximă de 100 Mbps. Toate routerurile vor fi informate despre necesitatea de a recalcula rutele. Noua rută pentru fluxul video evită linkul congestionat, fiind: S–R1–R5–R6–R4–D.

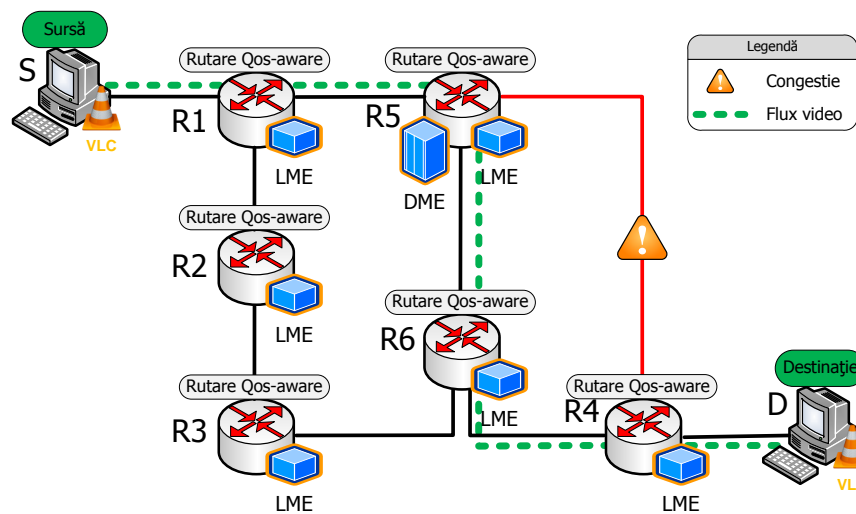


Figura 7.2 Testbed – Caz 2 (Rutare QoS-aware)

Figura 7.3 ilustrează magnitudinea evenimentelor de pierdere în cele două cazuri. În Cazul 1 pierderile apar în mod continuu deoarece rutarea convențională nu ține cont de condițiile de trafic. Acest lucru duce la o transmisie neinteligibilă. În Cazul 2 calitatea streamingului este afectată doar pentru o perioadă scurtă, corespunzătoare detecției congestiei și reconfigurării rutelor.

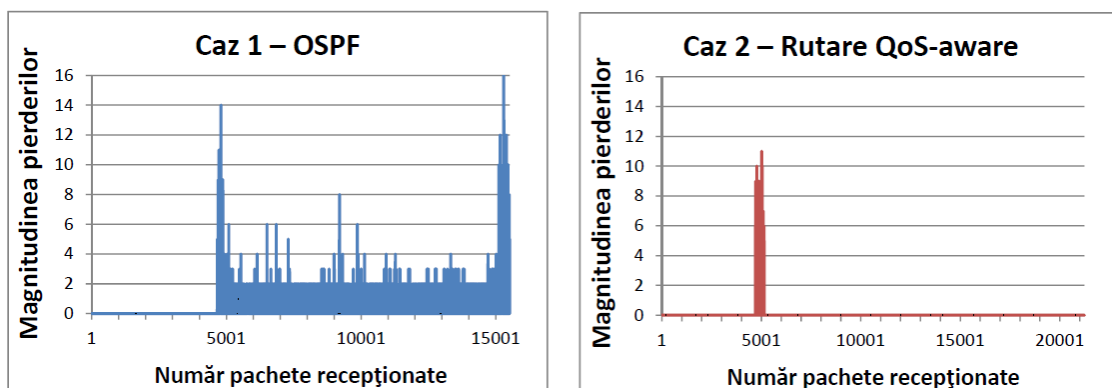


Figura 7.3 Magnitudinea pierderilor

Figura 7.4 compară evoluția ratei de succes pe durata experimentului, iar Tabelul 7.1 descrie parametrii VQ calculați pentru fluxul recepționat, în cazul celor două scheme de rutare.

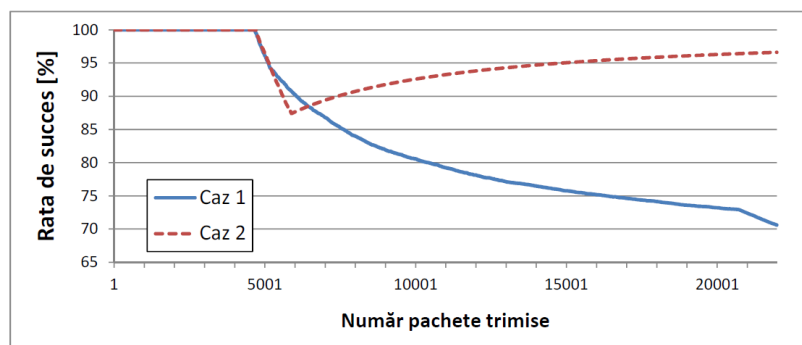


Figura 7.4 Evoluția ratei de succes

Tabela 7.1 Parametrii de calitate ai fluxului video recepționat

	Caz 1 – OSPF	Caz 2 – Rutare QoS-aware
Numărul de pachete trimise	21980	21980
Numărul de pachete recepționate	15519	21239
Numărul de pachete pierdute	6461	741
Procentul de pachete pierdute [%]	29.39%	3.37%
Magnitudinea medie a pierderilor	0.416	0.035
Magnitudinea maximă a pierderilor	16	11
Numărul de discontinuități	4413	273
Rata de succes [%]	70.61%	96.63%

## 7.4 Concluzii

Testele au demonstrat că un algoritm de rutare cu metrică dinamică poate beneficia de conștientizarea stării, deci sistemul de management al rutării oferă o soluție fezabilă în ceea ce privește controlul congestiei. Informațiile despre starea curentă a rețelei se folosesc pentru ajustarea adaptivă a mecanismelor de rutare. Cunoscând în toate nodurile rețelei condițiile de trafic, este posibilă îmbunătățirea performanței globale a transmisiilor prin activarea unei scheme de rutare adaptive. Soluția propusă elimină neajunsurile întâlnite în cazul protocolului OSPF în ceea ce privește verificarea conectivității dintre noduri și metricile de rutare folosite.

Prin activarea unei soluții de rutare QoS-aware apariția congestiei nu poate fi eliminată în totalitate, dar se poate detecta și se poate reduce impactul acesteia asupra transmisiunilor din rețea. Rezultatele experimentale arată că prin detecția evoluțiilor critice este posibilă reducerea pierderilor de pachete.

Principalul avantaj al rutării QoS-aware se manifestă prin capacitatea de a elimina congestia printr-o rerutare care evită legătura congestionată, pe când codarea în rețea poate doar să reducă congestia printr-o compresie a datelor transmise pe legătura afectată. Abordarea bazată pe rutare QoS-aware este independentă de fluxurile individuale deoarece nu trebuie prelucrate pachetele, ci doar rutate pe baza setărilor din tabela de rutare. În plus, nu trebuie folosite resurse suplimentare.

Dezvoltările ulterioare prevăd alegerea în mod adaptiv a protocolului de rutare QoS-aware activat în nodurile rețelei, în funcție de: *a*) tipul și arhitectura rețelei (cablată sau wireless), *b*) caracteristicile și dinamicitatea traficului și *c*) tipul serviciilor oferite în rețea. Protocolul de rutare utilizat va fi ales de către DME care dispune de o viziune globală asupra rețelei și are dreptul de a lua astfel de decizii, iar activarea și configurarea protocolului respectiv pe fiecare router se va realiza de către LME responsabil de nodul respectiv.

## Capitolul 8

# Implementarea și evaluarea tehnicilor de predicție a traficului

### 8.1 Motivație

Predicția traficului joacă un rol important în garantarea calității serviciilor (QoS) într-o rețea IP, putând fi folosită în scheme de control care modifică funcționarea rețelei, de exemplu procesul de rutare sau mecanisme de evitare a congestiei. Alegerea metodei de predicție reprezintă un compromis între intervalul de predicție, eroarea de predicție și costul computațional. În literatura de specialitate au fost propuse diferite metode de predicție a parametrilor de trafic, dar rămâne neclar care dintre ele poate asigura performanța necesară, fiind în același timp simplă și adaptivă. Se consideră problema predicției ratei de transfer. Se dorește a se identifica metoda cea mai potrivită pentru predicția parametrilor de trafic, ținând cont atât de precizia, cât și de complexitatea soluției.

### 8.2 Testarea performanțelor tehnicilor liniare de predicție

Se compară capacitatea de predicție a următoarelor tehnici: modelul ARMA, algoritmul ARAR, algoritmul HW și predicția prin rețele neuronale. În cazul rețelelor neuronale (NN – Neural Network) se tratează atât problema învățării multi-task, cât și problema învățării multirezoluție prin folosirea transformatei wavelet, respectiv combinarea celor două abordări. Pentru evaluarea predictorilor liniari se folosește software-ul *ITSM 2000*, în timp ce pentru simularea rețelelor neuronale se apelează la mediul de dezvoltare *MATLAB*. S-a ales o colecție de date alcătuită din  $N = 200$  de măsurători consecutive de trafic, indicând rata de transfer, care se utilizează pentru modelare liniară și pentru instruirea predictorilor NN, iar un set ulterior de 20 de valori (care nu sunt incluse în setul de antrenare/modelare) este folosit pentru testare.

### 8.3 Evaluarea tehnicilor liniare de predicție

Calitatea predicției se evaluează prin intermediul metricilor de performanță: MSE (Mean Square Error), NMSE (Normalized MSE), RMSE (Root MSE), NRMSE (Normalized Root MSE), MAPE (Mean Absolute Percentage Error), coeficientul de corelație  $r$  și coeficientul de eficiență  $E$ .

Diferitele metode de predicție descriu în felul următor șirul de date modelat:

- model ARMA(3, 5):

$$X(t) = 2.142X(t-1) - 2.038X(t-2) + 0.8036X(t-3) + Z(t) - 1.258Z(t-1) + 0.8077Z(t-2) + 0.3543Z(t-3) - 0.3987Z(t-4) + 0.1565Z(t-5),$$

unde varianța zgomotului alb  $Z$  cu media zero este:  $\sigma^2 = 0.050751$ .

- modelul AR(11):

$$X(t) = -0.0481X(t-1) - 0.204X(t-2) - 0.2266X(t-6) - 0.1856X(t-11).$$

- Holt–Winters nesezonal: se face cu optimizarea parametrilor, rezultând parametrii de netezire  $\alpha = 1$  și  $\beta = 0.04$ .
- Holt–Winters sezonal (HWS): după optimizarea parametrilor prin minimizarea sumei erorilor pătratice de un pas se obțin parametrii de netezire  $\alpha = 0.85$ ,  $\beta = 0$  și  $\gamma = 1$ .

Tabelul 8.1 conține metricile de performanță pentru cele patru metode analizate de predicție liniară. Metricile indică o performanță slabă a acestora, de exemplu: NMSE mică, MAPE de valoare mare sau coeficient de eficiență  $E$  redus. Modelele liniare nu sunt potrivite pentru predicția traficului de rețea deoarece nu se pot adapta la variația datelor, nu pot urmări variația dinamică a traficului.

Tabela 8.1 Metrici de performanță ale predictorilor liniari

Metodă	MSE	NMSE	RMSE	NRMSE	MAPE	$r$	$E$
ARMA	0.3864	1.2281	0.6216	1.1082	19.09%	-0.521	-0.293
ARAR	0.3068	0.975	0.5539	0.9874	20.08%	0.254	-0.0263
HW	0.269	0.855	0.5186	0.9246	20.73%	0.8935	0.1002
HWS	0.2112	0.671	0.4595	0.8192	19.69%	0.6933	0.29358

Dintre tehnicile liniare de predicție, cea mai bună s-a dovedit a fi algoritmul HWS. Totuși, din punct de vedere al preciziei, HWS nu se califică în rândul predictorilor performanți. Figura 8.1 arată evoluția predicției comparativ cu datele măsurate, histograma erorilor de predicție, respectiv grafica „cuantilă–cuantilă” (QQ – Quantile–Quantile). Histograma permite evaluarea distribuției erorilor, adică a diferențelor dintre valorile dorite și cele prezise. Grafica QQ compară cuantila empirică (valorile obținute prin predicție pe axa  $0y$ ) cu cea teoretică (valorile reale observate pe axa  $0x$ ). Observăm că valorile rezultante prin predicție urmăresc într-o oarecare măsură evoluția traficului. Totuși, grafica QQ nu este liniară, deci valorile reale nu sunt modelate suficient de exact.

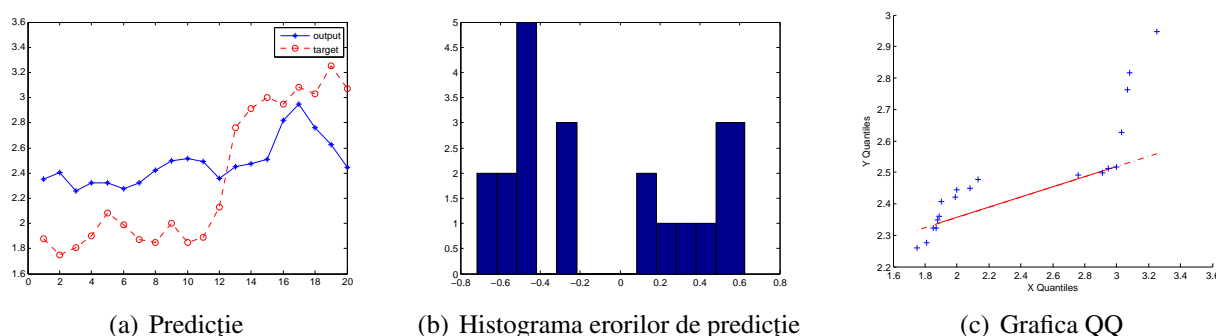


Figura 8.1 HWS – Evaluarea predicției

## 8.4 Evaluarea predicției prin rețele neuronale

Pentru rețele neuronale (NN) folosim un singur strat ascuns de neuroni deoarece mai multe straturi ar implica calcule mult mai complexe, consumatoare de timp și de putere de procesare, fără a garanta o precizie mai bună. Se evaluează performanța NN în funcție de metoda de instruire aleasă. Se



compară patru paradigme de antrenare, dintre care trei sunt întâlnite și în literatura de specialitate (instruire STL – Single-Task Learning, instruire STL cu descompunere multirezoluție și instruire MTL – Multi-Task Learning), iar una este proprie (instruire MTL cu multirezoluție).

S-a optat pentru o rețea de structură  $4 - 5 - n_o$  cu algoritm *backpropagation*, adică 4 noduri de intrare, un strat ascuns de 5 neuroni (cu funcție sigmoidală logaritmică), respectiv un strat de ieșire cu  $n_o$  noduri de ieșire, caracterizate de o funcție de activare liniară. Se alege  $n_o = 1$  pentru instruire STL, respectiv  $n_o = 3$  pentru MTL. Experimentele se execută cu aceleași valori inițiale ale ponderilor și ale pragurilor. Numărul maxim de epoci se setează la 300 pentru paradigma STL și MTL, iar în cazul învățării multirezoluție fiecare etapă are o durată de 100 de iterații. S-a ales metoda de antrenare *trainlm* bazată pe *algoritmul Levenberg–Marquardt* deoarece converge rapid și oferă o precizie satisfăcătoare. Rata de învățare a fost setată la 0.01, fără momentum.

### 8.4.1 Instruire STL

Figura 8.2(a) ilustrează arhitectura rețelei neuronale utilizate în cazul procesului de învățare prin intermediul paradigmei tradiționale de antrenare folosite în probleme de predicție, și anume învățarea unui singur task (STL).

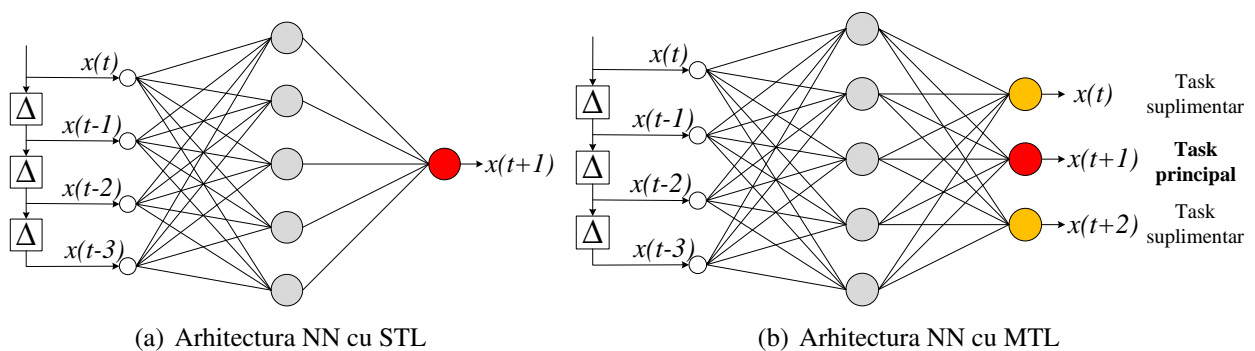


Figura 8.2 Arhitectura rețelei neuronale

### 8.4.2 Instruire STL cu descompunere multirezoluție

Prin procesul de instruire multirezoluție, șirul de date de antrenare  $s^m$  se descompune în seturi distincte: setul original (având rezoluția cea mai fină) și seturi care reprezintă date de rezoluție mai grosieră  $s^j, j < m$ . Pentru descompunere se folosește transformata wavelet Haar.

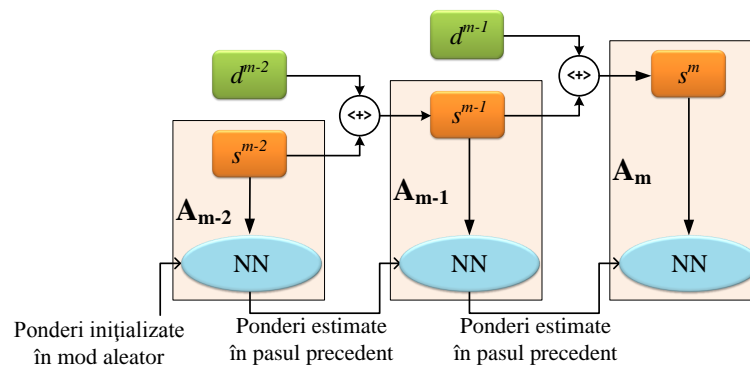


Figura 8.3 Schema de bază a instruirii multirezoluție



Numărul de rezoluții se alege ca un compromis între complexitatea modelului și precizia predicției. În cadrul experimentelor s-a realizat o descompunere de nivel 2 deoarece s-a observat că o rezoluție suplimentară nu îmbunătățește semnificativ performanța, dar crește complexitatea. NN execută următoarea secvență ordonată de activități de învățare:  $A_{m-2} \rightarrow A_{m-1} \rightarrow A_m$ .

### 8.4.3 Instruire MTL

Paradigma de instruire multi-task (MTL) este prezentată în Figura 8.2(b) și presupune antrenarea rețelei astfel încât să învețe mai multe taskuri deodată. Pe lângă predicția valorii viitoare  $x(t+1)$ , NN generează la ieșirea sa valoarea curentă  $x(t)$  și o altă valoare viitoare  $x(t+2)$ .

### 8.4.4 Instruire MTL cu descompunere multirezoluție

În cadrul acestei teze de doctorat, se propune o nouă paradigmă de instruire a unei rețele neuronale, și anume combinarea învățării multi-task cu metoda de descompunere multirezoluție. Acest lucru înseamnă că rețeaua va învăța simultan taskuri multiple, iar pentru fiecare astfel de sarcină va fi antrenată cu diferite rezoluții ale setului de date. În cele ce urmează, noua paradigmă propusă va fi denumită *învățare MTL cu multirezoluție* și este ilustrată în Figura 8.4.

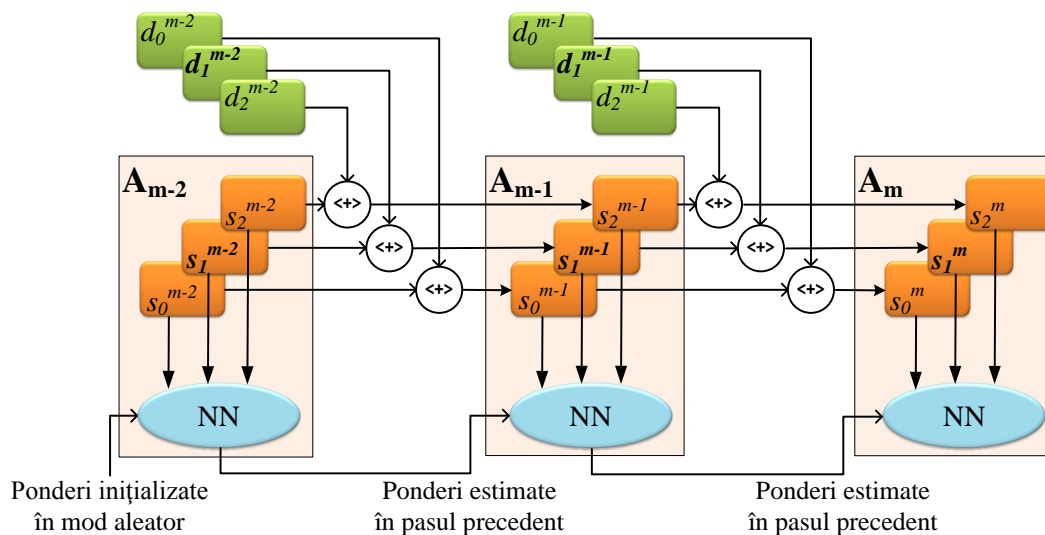


Figura 8.4 Schema de bază a instruirii MTL cu multirezoluție

## 8.5 Comparația rezultatelor experimentale

Figura 8.5 prezintă testarea predictorilor, comparând ieșirile obținute cu valorile dorite. În Figura 8.6 putem compara histograma erorilor de predicție obținute.

Pentru a evalua obiectiv performanțele predictorilor bazați pe rețele neuronale, analizăm valorile metricilor de performanță din Tabelul 8.2. Două tehnici prezintă metrici de performanță apropiate, ambele implică învățarea multirezoluție. Dintre aceste două metode nu putem alege un câștigător clar deoarece, rulând simulările de mai multe ori, rezultatele diferă ușor. O precizie puțin mai slabă a fost obținută prin abordarea de antrenare multi-task care însă prezintă avantajul că are o complexitate computațională mai redusă. Cea mai slabă performanță o are metoda tradițională cu învățare STL, aceasta fiind și cea mai simplă, necesitând cele mai puține calcule.

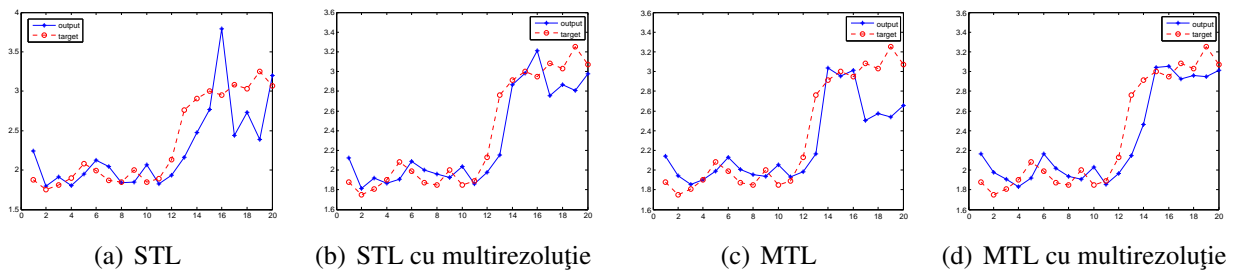


Figura 8.5 Rețele neuronale – Evaluarea predicției

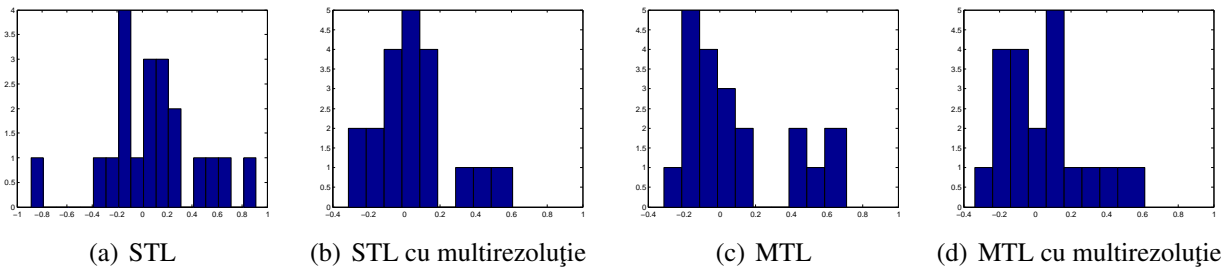


Figura 8.6 Rețele neuronale – Histograma erorilor de predicție

Tabela 8.2 Metrice de performanță ale predictorilor bazați pe rețele neuronale

Metrice	Single-Task Learning		Multi-Task Learning	
	Instruire STL	Instruire STL cu multirezoluție	Instruire MTL	Instruire MTL cu multirezoluție
MSE	0.14462	<b>0.049385</b>	0.091859	0.050576
NMSE	0.45965	<b>0.15696</b>	0.29195	0.16074
RMSE	0.38029	<b>0.22223</b>	0.30308	0.22489
NRMSE	0.67797	<b>0.39618</b>	0.54032	0.40093
MAPE	11.08%	<b>6.92%</b>	8.69%	7.53%
$r$	0.75583	<b>0.92009</b>	0.86099	0.91699
$E$	0.51616	<b>0.83478</b>	0.69269	0.8308

## 8.6 Concluzii

S-a demonstrat că este posibilă predicția parametrilor de trafic cu o anumită precizie, într-un mod eficient din punct de vedere computațional. Rezultatele experimentale arată că tehnicile liniare bazate pe modele statistice nu sunt potrivite pentru predicția traficului de rețea fiindcă nu se pot adapta la variația dinamică a datelor și la caracterul neliniar al traficului. De aceea nu este indicată folosirea lor în acest domeniu, deoarece chiar și o predicție prin mediere oferă rezultate mai bune.

Avantajul folosirii unui predictor NN constă în capacitatea acestuia de a capta neliniaritățile traficului, respectiv posibilitatea efectuării unor predicții iterative cu un singur pas, iar acestea s-au dovedit a oferi rezultatele cele mai bune. Rezultatele promițătoare privind capacitatea de predicție ne motivează să implementăm practic un predictor bazat pe NN cu instruire MTL.

În prezent presupunem că predicția se aplică doar ratei de transfer deoarece dacă nu sunt îndeplinite cerințele legate de aceasta, vor fi afectați și ceilalți parametri QoS. Dar adaptabilitatea unor soluții proactive de rutare ar putea fi mărită de exemplu prin evaluarea *întârzierii datorate așteptării în cozi de rutare* ca un semn direct al supraîncărcării legăturilor și a routerelor.

## Capitolul 9

# Îmbunătățirea managementului rutării prin predicție bazată pe rețele neuronale

### 9.1 Introducere

Un algoritm tradițional de rutare nu poate reacționa imediat la congestie ceea ce rezultă în pierderi de pachete, introducerea unor întârzieri suplimentare și scăderea calității serviciilor. Dezvoltarea unei abordări de management al rutării pe baza predicției poate fi benefică din punct de vedere al utilizării mai eficiente a legăturilor și din punct de vedere al reducerii numărului de pachete pierdute [Kul10]. Prin capacitatea de a prezice evoluția traficului pornind de la dinamica transmisiilor curente, se integrează în rețea o inteligență suplimentară care permite optimizarea performanței prin adaptări autonome, luând în considerare condiții anticipate de trafic.

#### 9.1.1 Managementul adaptiv al rutării

Metodele de control adaptiv al traficului în timp real care stabilesc în mod dinamic rutarea fluxurilor, în funcție de schimbările stării rețelei, presupun o înțelegere profundă a dinamicității traficului. Dacă traficul de pe legături este generat în preponderență de aplicații multimedia, obiectivul principal al integrării predicției în entități de management este îmbunătățirea calității de redare a fluxurilor video în rețele congestionate, respectiv scurtarea perioadei în care imaginea rămâne înghețată din cauza pierderilor de pachete [Chu10]. Acest scop poate fi atins implementând un predictor de trafic și un mecanism de control al fluxurilor prin rerutarea transmisiilor afectate de congestie.

#### 9.1.2 Mecanisme de rutare și control al traficului pe baza predicției

Integrarea predicției în mecanisme de rutare de tip QoS-aware și în tehnici de control al traficului sunt prezentate printre altele în lucrările [Lia04], [Fan07], [Guo09], [Li09b], [Chu10] sau [Mas10]. Avantajele oferite de predicție din punct de vedere al rutării multicale se demonstrează de exemplu în [Mar06], [Li09a], [Cai10] și [Ju08]. Pornind de la ideile prezentate în aceste articole și luând în considerare rezultatele experimentale din Capitolul 8, s-a optat pentru implementarea practică a unui predictor bazat pe rețele neuronale cu instruire multi-task (MTL). Cu ajutorul acestui predictor se propune în principal identificarea situațiilor de congestie, ceea ce se realizează prin predicția ratei de transfer disponibile, spre deosebire de soluțiile amintite mai sus care prezic: *a*) debitul fluxului video [Lia04], *b*) întârzierea în cozi de rutare [Guo09], *c*) rata de pierdere a pachetelor [Cai10], *d*) tipul legăturii wireless și throughputul incremental [Ju08] etc. Reacția la congestie se manifestă prin redirecționarea traficului, spre deosebire de soluții alternative precum: *a*) reducerea

ratei transmisiei video ([Li09b]), *b*) eliminarea controlată a pachetelor ([Chu10]) sau *c*) alocarea în avans a ratei corespunzătoare unor transmisii viitoare ([Lia04], [Fan07], [Mas10]).

## 9.2 Implementarea practică a predictorului bazat pe NN

S-a implementat un predictor bazat pe rețele neuronale (NN), cu paradigma de instruire multi-task (MTL) combinată cu mecanismul de fereastră glisantă. Parametrul de rețea prezis este rata de transfer disponibilă (ATR) pe legăturile unidirecționale din rețea. În vederea realizării practice s-a ales limbajul C++ sub Linux. Pentru dezvoltarea aplicației s-au utilizat facilități de multi-threading, networking și parsare XML oferite de cadrul de lucru Qt. Pentru implementarea funcționalităților specifice rețelelor neuronale s-a apelat la biblioteca Flood. Aceasta este o bibliotecă C++ open-source [Lop10] și conține o implementare completă a unui perceptron multistrat, incluzând diferite obiective funcționale și algoritmi de antrenare.

Programul relizat este denumit PredictorNN și poate fi utilizat în trei moduri diferite: 1) *online*: rețeaua neuronală este antrenată cu date măsurate în timp real și realizează predicție în timp real; 2) *offline*: antrenarea și predicția presupune existența în prealabil a setului de date folosit pentru instruire și testare; 3) *hibridă*: învățarea are loc pe baza unui set de date prestabilit, iar procesul de predicție se desfășoară în timp real. Aplicația se pornește pe o mașină Linux din linia de comandă de către un utilizator cu drepturi root prin comanda:

```
# ./PredictorNN [-t <type>] [-p <port>] [-d <dst_port>] [-f <train_file>]
[-o <out_file>] [-i <in_node>] [-n <hidden>] [-N <training>] [-e <epoch>]
```

## 9.3 Integrarea predictorului în sistemul de management al rutării

Figura 9.1 ilustrează interacționarea dintre diferite părți ale sistemului de management predictiv și propune o modalitate de colaborare a acestuia cu un algoritm de rutare mulcicale.

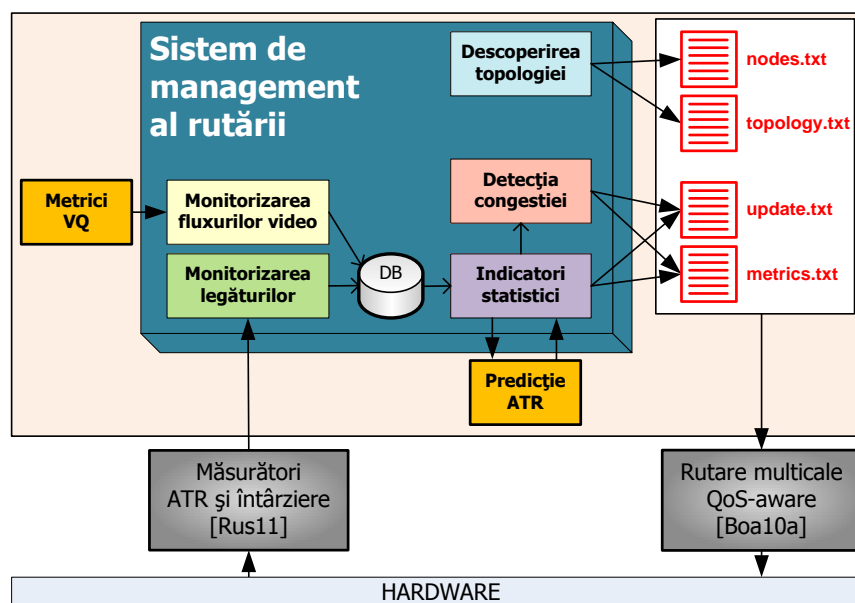


Figura 9.1 Sistemul de management predictiv

Predictorul NN este utilizat de către entitățile LME. Deoarece predictorul este un software de sine-stătător, interacționarea cu LME se realizează prin mesaje XML trimise prin UDP. În acest fel, predictorul și entitatea de management pot rula fie pe același nod, fie pe noduri diferite, fără a afecta modul de comunicare. LME cunoaște adresa și portul destinație pe care ascultă predictorul și trimite la acesta valorile ratei de transfer disponibile la fiecare secundă. Predictorul va răspunde cu prezicerea valorii viitoare, astfel realizându-se o predicție la o secundă.

## 9.4 Evaluarea sistemului predictiv de management al rutării multcale

Performanța sistemului predictiv de management al rutării se evaluează considerând un algoritm de rutare multcale de tip QoS-aware, denumit SAMP (Situation Aware Multipath). Pentru a evita o legătură congestionată, se recalculează toate căile care conțin legătura respectivă astfel încât să se asigure rata de transfer disponibilă maximă și întârzierea minimă. Sistemul implementează o strategie de optimizare de tip cross-layer, deciziile de rutare ale stratului rețea fiind dictate de straturile superioare (rata de pierdere a pachetelor) și inferioare (ATR și întârzierea). Arhitectura folosită pentru evaluarea soluției predictive propuse este ilustrată în Figura 9.2. Scenariul de testare are o durată de 5 minute și se trimit 3 fluxuri MPEG-4 prin RTP/UDP: a) fluxul A de la S la D1; b) fluxul B de la S la D1 și c) fluxul C de la S la D2. Se introduce congestie pe legătura R5–R4 după 1 minut, iar pe R5–R6 după 2 minute de la începerea testului. Se compară următoarele soluții de rutare multcale intra-domeniu: 1) Caz 1: ECMP (Equal-Cost Multi-Path), o versiune de rutare multcale a protocolului OSPF; 2) Caz 2: SAMP fără predicție; 3) Caz 3: SAMP cu predicție.

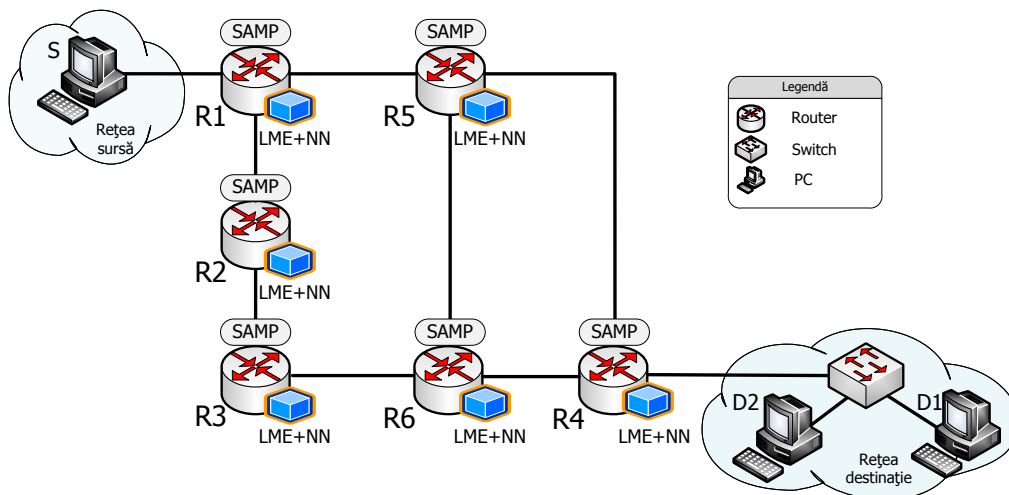


Figura 9.2 Arhitectura de test

Rețeaua neuronală pe care se bazează predictorul integrat în entitățile LME este simplă și de dimensiune mică: 4–5–3. Aplicația Predictor<sub>NN</sub> este folosită în modul hibrid de funcționare. Setul de date folosit pentru predicție a fost colectat prin măsurători efectuate într-un testbed real. Scopul este de a învăța NN să recunoască situația de congestie.

### 9.4.1 Rezultate experimentale – Caz 1 (ECMP)

La baza ECMP se află protocolul de rutare OSPF. ECMP va identifica două transmisii care vor fi rutate pe căi diferite: 1) fluxul A și B, trimise între S și D1 pe ruta R1–R5–R4 și 2) fluxul C, trimis

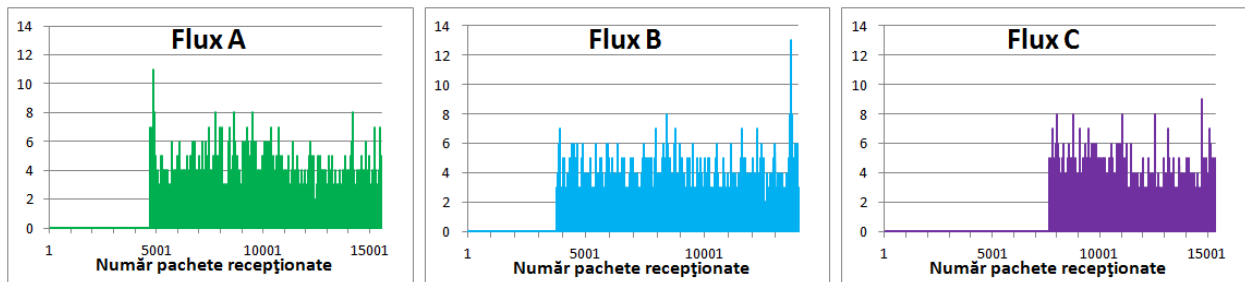


Figura 9.3 Magnitudinea pierderilor pe durata experimentului – Caz 1 (ECMP)

de la S la D2 pe ruta R1–R5–R6–R4. Rutele nu sunt modificate după ce anumite legături devin congestionate. Procentul total de pachete pierdute este 30.96%. Figura 9.3 prezintă magnitudinea pierderilor. Observăm că pierderile apar în mod constant după introducerea congestiei pe R5–R4 și R5–R6. Figura 9.4 arată rata de succes a transmisiilor pe întreaga durată a experimentului.

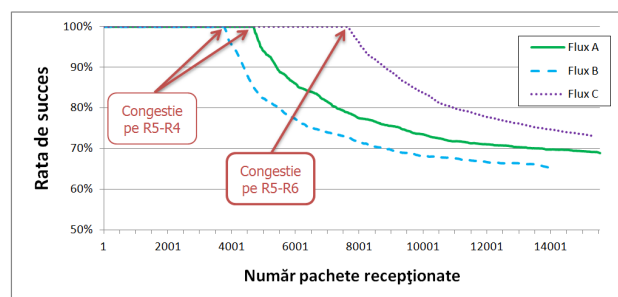
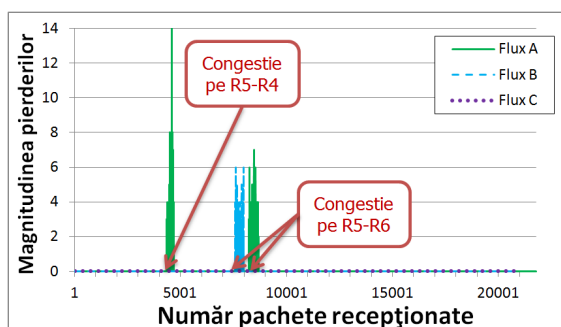


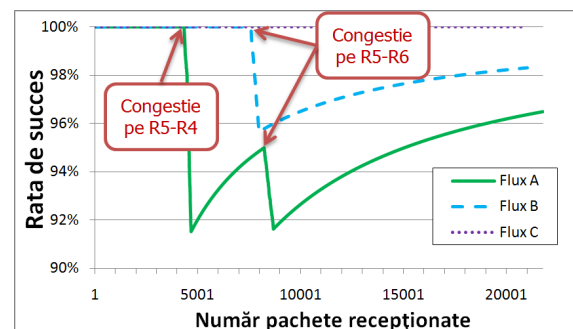
Figura 9.4 Evoluția ratei de succes pe durata experimentului – Caz 1 (ECMP)

### 9.4.2 Rezultate experimentale – Caz 2 (SAMP fără predicție)

La începerea experimentului nu există congestie în rețea, iar algoritmul SAMP selectează pentru fiecare stream căi diferite, respectând cerințele de ATR și întârziere ale fluxurilor video: 1) fluxul A este transmis pe ruta R1–R5–R4; 2) fluxul B pe R1–R5–R6–R4, iar 3) fluxul C este rutat pe R1–R2–R3–R6–R4. După 1 minut se introduce congestie pe R5–R4. LME pe R4 detectează congestia pe baza pachetelor pierdute și a scăderii ATR și va genera o comandă de recalculare a rutelor. Noua cale selectată pentru fluxul A este R1–R5–R6–R4.



(a) Magnitudinea pierderilor



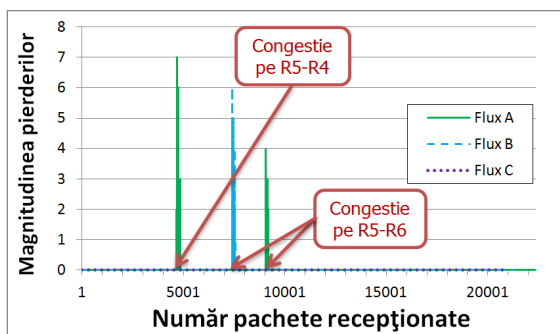
(b) Evoluția ratei de succes pe durata experimentului

Figura 9.5 Caz 2 (SAMP fără predicție)

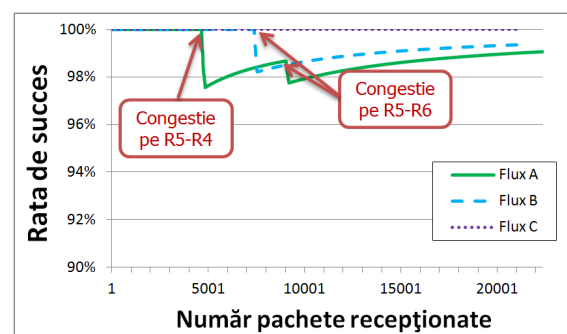
După 2 minute se introduce congestie și între R5 și R6. LME situat pe R6 identifică congestia, iar SAMP este informat despre necesitatea recalculării rutelor urmate de fluxurile A și B, selectând: R1–R2–R3–R6–R4. Figura 9.5(a) ilustrează magnitudinea evenimentelor de pierdere care au o durată scurtă. Procentul de pachete pierdute (din cauza congestiei și a rerutării) este de 1.78%. În Figura 9.5(b) se poate observa evoluția ratei de succes pe durata experimentului. Valoarea ratei de succes globale este de 98.22%, semnificativ mai mare decât cea obținută în cazul folosirii protocolului ECMP (69.04%).

### 9.4.3 Rezultate experimentale – Caz 3 (SAMP cu predicție)

Această abordare diferă de Cazul 2 (fără predicție) în ceea ce privește metoda de detecție a congestiei, ținând cont de predicția valorilor viitoare. Pe fiecare router rulează aplicații de predicție a ratei de transfer disponibile pe legăturile *inbound*. Astfel, entitățile LME aflate pe R4 și R6 vor semnaliza cu 1 secundă mai repede apariția congestiei decât ar fi posibil prin detecția pe baza monitorizării. Timpul suplimentar câștigat oferă posibilitatea rerutării mai rapide a fluxurilor. Calitatea streamin-gului este afectată pentru o perioadă mai scurtă decât în Cazul 2, iar procent global de pierdere este de trei ori mai mic (0.54%). Pierderile nu se pot elimina în totalitate deoarece și procesul de rerutare duce la pierderi de pachete sau la pierderea secvențialității la destinație. Figura 9.6(a) ilustrează magnitudinea pierderilor, iar Figura 9.6(b) descrie rata de succes pe durata experimentului. Valoarea globală finală a ratei de succes este mai mare decât fără predicție, ajungând la 99.46%.



(a) Magnitudinea pierderilor



(b) Evoluția ratei de succes pe durata experimentului

Figura 9.6 Caz 3 (SAMP cu predicție)

Deși rețeaua neuronală a fost instruită folosind un set de antrenare diferit de evoluția traficului de pe legături pe durata experimentului, precizia predicției ATR a fost mare, în termeni de eroare medie pătratică normată (NMSE) și coeficient de eficiență ( $E$ ). De exemplu predicția ratei de transfer disponibile pe legătura R5–R4 este caracterizată de  $NMSE = 0.0011$  și  $E = 99.89\%$ .

## 9.5 Concluzii

Obiectivul principal în cadrul experimentelor efectuate a fost îmbunătățirea calității de redare a fluxurilor video în rețele congestionate, respectiv scurtarea perioadei în care imaginea rămâne înghețată din cauza pierderilor de pachete. Prin intermediul experimentelor s-a demonstrat faptul că predicția poate duce la o îmbunătățire a performanței rețelei și a serviciilor din rețea deoarece congestia poate fi identificată mai repede, putând fi luate mai repede măsurile necesare pentru eliminarea sa. Sistemul predictiv prezentat nu se pretinde a fi o soluție optimă și perfectă, ci oferă un *proof-of-concept*, demonstrând fezabilitatea abordării propuse.



# Capitolul 10

## Contribuții la managementul rutării în viitorul Internet

### 10.1 Sumarul contribuțiilor personale

Teza de doctorat abordează problematica managementului rutării în viitorul Internet, aducând următoarele contribuții personale:

#### Contribuția 1. Stadiul actual al tehnicilor de management pentru viitorul Internet

Această contribuție se referă la realizarea unui studiu extins în domeniul tehnicilor de management pentru viitorul Internet. Se identifică limitările tehnologiilor curente de management, împreună cu perspectivele viitoare în domeniul managementului rețelelor. Sunt descrise noi tehnici de management autonom, bazate pe strategii evolutive (PBNM, ASA și FOCALÉ) și abordări de tip clean-slate (ANA, AutoI, Self-Net și INM). Observațiile pe baza evaluării stadiului actual al managementului ajută la proiectarea unui sistem de management al rutării care este conștient de starea rețelei și acționează în mod autonom pentru îmbunătățirea procesului de rutare.

**Contribuția se găsește în:** Capitolul 3

**Publicații:** [Bar10a]

#### Contribuția 2. Metodologii propuse pentru detecția congestiei

În cadrul acestei contribuții s-au propus două metode care permit detecția congestiei pe legăturile dintr-o rețea IP. Prima metodă se bazează pe calitatea fluxurilor video transmise prin protocolul RTP, urmărind evoluția metricilor de calitate video VQ, precum: numărul de pachete pierdute, rata de succes a transmisiei, magnitudinea pierderilor, frecvența pierderilor, jitterul etc. Noutatea acestei abordări constă în faptul că se monitorizează metrici VQ pe fiecare router din rețea, nu doar la nodul destinație, instrumentul putând fi folosit pentru controlarea procesului de rerutare a fluxurilor. Cea de-a doua metodă realizează detecția congestiei pe baza monitorizării ratei de transfer disponibile ATR pe legăturile din rețea, calculând următorii indicatori statistici: media simplă mobilă SMA și deviația standard SD. Prima metodă propusă a fost implementată practic în limbajul C++ sub sistemul de operare Linux, aplicația fiind compusă din mai multe thread-uri (principal, captură, metrici VQ, oprire). Presupunând că anterior s-au identificat fluxurile, programul `RTPsniffer` salvează într-un fișier de ieșire metricile VQ calculate la recepția fiecărui pachet. A doua metodă (bazată pe ATR) nu a fost implementată ca o aplicație separată, fiind un modul software inclus în sistemul prezentat în Contribuția 3.

**Contribuția se găsește în:** Capitolul 4

**Publicații:** [Bar09], [Bar10b], [Bar11b]

### Contribuția 3. Proiectarea și implementarea unui sistem de management al rutării

Pe baza evaluării stadiului actual al managementului pentru viitorul Internet (Contribuția 1), ținând cont mai ales de aspectele legate de rutare, se propune un sistem autonom prin care este posibil managementul rutării pe baza conștientizării stării rețelei. Se definesc două tipuri de entități de management: 1) *entitatea de management local* LME care se ocupă de aspectele locale ale gestionării rutării și 2) *entitatea de management de domeniu* DME responsabilă de problemele care necesită o viziune globală asupra rețelei. Obiectivul principal este includerea procesului de monitorizare ca parte integrată în arhitectura de rețea. Proiectarea sistemului se bazează pe ideea de a separa procesul de monitorizare și actualizare a stării rețelei de procesul de rutare în sine. În vederea monitorizării stării rețelei se folosesc instrumentele definite în Contribuția 2. Acestea oferă informații despre rata de transfer disponibilă și latența pe legăturile dintre noduri, respectiv despre pierderi de pachete RTP, fiind posibilă detecția congestiei. Entitățile LME și DME au fost implementate practic în limbajul C++ sub sistemul de operare Linux folosind cadrul de lucru Qt și baze de date MySQL. Comunicarea se realizează pe baza unor mesaje XML, structura acestora fiind definită folosind limbajul XSD.

**Contribuția se găsește în:** Capitolul 5

**Publicații:** [Bar10b], [Bar11b], [Boa10a]

### Contribuția 4. Managementul congestiei prin activarea tehnicii Network Coding

O posibilă aplicație a sistemului de management al rutării în viitorul Internet este managementul congestiei utilizând tehnica Network Coding. Deoarece codarea în rețea presupune foarte multe operații suplimentare (implicând atât resurse computaționale, cât și resurse ale legăturilor), aceasta trebuie să fie activată doar în cazul în care este strict necesară, neexistând alte opțiuni pentru îmbunătățirea calității serviciilor curente dintr-o rețea. Decizia privind situațiile în care se justifică activarea NC este luată de către sistemul de management (mai ales DME) pe baza informațiilor despre starea rețelei administrate. Rezultatele experimentale obținute cu ajutorul unei implementări practice preliminare arată că activarea codării în rețea duce la îmbunătățirea performanței globale a transmisiilor, în scenariile studiate rata de pierdere scăzând de la 18% . . . 21% fără NC la 0, 5% . . . 3% cu activarea schemei NC. Un dezavantaj important al NC este faptul că nu reușește să elimine în totalitate pierderile de pachete fiindcă nu poate rezolva situația de congestie. Deși oferă o calitate mai bună a serviciilor, nu este o soluție optimală. Network Coding a fost testat într-o rețea cablată Ethernet, dar adevărata valoare a tehnicii se observă în cazul legăturilor fără fir.

**Contribuția se găsește în:** Capitolul 6

**Publicații:** [Cor11], [Pol09], [Rus10a]

### Contribuția 5. Managementul congestiei prin rutare QoS-aware

O altă aplicație a sistemului de management propus se prezintă sub forma unei strategii de rutare QoS-aware. Metricile pe baza cărora se aleg căile de rutare sunt modificate în mod dinamic, în funcție de resursele de legătură disponibile în rețea. Strategia de rutare permite managementul congestiei prin rutare conștientă de starea rețelei, numită rutare QoS-aware, care presupune rerutarea transmisiilor în condiții nefavorabile de trafic, evitând căile supraîncărcate. Soluția este testată într-o topologie de rețea reală și se compară cu protocolul de rutare OSPF. Dezavantajul principal al OSPF este faptul că nu se detectează în mod corespunzător congestia apărută în rețea. Managementul propus aici presupune utilizarea informațiilor despre starea curentă a rețelei pentru ajustarea adaptivă a mecanismelor de rutare. Rezultatele experimentale arată că prin detecția

evoluțiilor critice de trafic (rată de transfer sub un prag, latență prea mare) este posibilă reducerea pierderilor de pachete și a întârzierii, respectiv îmbunătățirea calității percepute QoE de utilizatorul final. În același timp, strategia de rutare propusă elimină neajunsurile protocolului OSPF în privința la verificarea conectivității dintre noduri. Această contribuție nu evită în totalitate apariția congestiei, dar este în stare să o controleze și să o elimine după ce aceasta este detectată. Astfel se reduce impactul negativ asupra transmisiunilor din rețea, deși nu se aplică nicio metodă de garantare a calității serviciilor.

**Contribuția se găsește în:** Capitolul 7

**Publicații:** [Bar11b], [Boa10a], [Boa10b], [Rus10b], [Rus10c]

### **Contribuția 6. Implementarea și evaluarea tehnicilor de predicție a traficului**

Se dă un set de rate de transfer monitorizate în rețea și se dorește predicția valorilor viitoare. Sunt implementate și comparate tehnici liniare de predicție care se bazează pe modele statistice și tehnici neliniare implicând folosirea rețelelor neuronale NN. Pentru acest ultim caz se evaluează performanța în funcție de metoda aleasă pentru instruirea rețelei. Se compară patru paradigme de antrenare, dintre care trei sunt întâlnite și în literatura de specialitate (instruire STL, instruire STL cu descompunere multirezoluție și instruire MTL), iar una este proprie (instruire MTL cu multirezoluție). Rezultatele experimentale arată că tehnicile liniare nu sunt potrivite pentru predicția traficului de rețea fiindcă nu se pot adapta la variația dinamică a datelor și la caracterul nelinier al traficului. Dintre metodele analizate, cea mai bună s-a dovedit a fi predicția bazată pe rețele neuronale implicând o instruire STL cu multirezoluție și o predicție iterativă cu un singur pas. O precizie puțin mai slabă a fost obținută prin abordarea de antrenare multi-task care însă prezintă avantajul unei complexități computaționale mai reduse. Rezultatele promițătoare privind capacitatea de predicție ne motivează să implementăm practic un predictor bazat pe NN cu instruire MTL (vezi Contribuția 7). Integrând predicția într-un sistem de gestionare a rutării, ar fi posibilă îmbunătățirea performanței rețelei pe baza unui management adaptiv.

**Contribuția se găsește în:** Capitolul 8

**Publicații:** [Bar11a], [Bar11c]

### **Contribuția 7. Îmbunătățirea managementului rutării prin predicție bazată pe rețele neuronale**

Prin capacitatea de a prezice evoluția ratei de transfer disponibile se integrează în entitățile de management o inteligență suplimentară care permite optimizarea performanței rețelei prin adaptări autonome, luând în considerare condiții anticipate de trafic. Obiectivul principal al integrării predicției în sistemul de management în această teză este îmbunătățirea calității de redare a fluxurilor video în rețele congestionate. În plus, se vizează scurtarea perioadei în care imaginea stagnează din cauza pierderilor foarte mari de pachete. Se evaluează o metodă de predicție bazată pe rețele neuronale cu învățare multi-task, implementată în C++ și integrată în sistemul de management al rutării multicale. Sistemul predictiv comandă deciziile de rutare luate de algoritmul de rutare multicale SAMP pe baza valorilor ATR obținute prin predicție. Soluția este testată în timp real într-un testbed practic și comparată cu strategiile de rutare ECMP și SAMP fără predicție. Rezultatele experimentale demonstrează că abordarea bazată pe predicție duce la o utilizare mai eficientă a legăturilor și se reduce numărul de pachete pierdute. În scenariul de test s-a reușit reducerea ratei de pierdere (de exemplu de la 1.78% fără predicție la 0.54% cu predicție), în timp ce în cazul aplicării protocolului ECMP pierderile au fost mult mai mari (de exemplu 30.96% din traficul total

trimis). Îmbunătățirile se datorează identificării mai rapide a congestiei și luării măsurilor pentru eliminare.

**Contribuția se găsește în:** Capitolul 9  
**Publicații:** [Bar11a], [Bar11d], [Boa11a], [Boa11b]

## 10.2 Remarci finale

Figura 10.1 prezintă legătura dintre contribuțiile personale aduse în domeniul studiat.

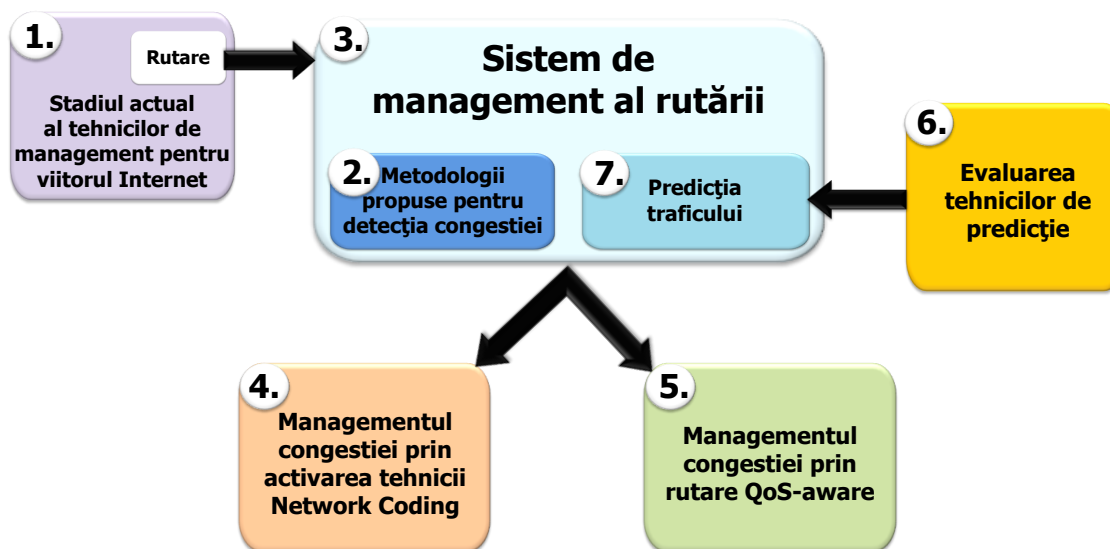


Figura 10.1 Structura contribuțiilor tezei

Nucleul tezei reprezintă sistemul de management al rutării (Contribuția 3) care a fost proiectat pornind de la stadiul actual al tehnicilor de management pentru viitorul Internet (Contribuția 1). Acest sistem de management al rutării conține un modul care permite detecția congestiei pe legăturile rețelei gestionate (Contribuția 2). Pentru sistemul proiectat și implementat au fost identificate două domenii de aplicabilitate: managementul congestiei prin activarea tehnicii Network Coding (Contribuția 4), respectiv managementul congestiei prin intermediul rutării QoS-aware (Contribuția 5). După evaluarea prin simulare a tehnicilor liniare și neliniare de predicție (Contribuția 6), s-a implementat și s-a integrat în sistemul propus un modul de predicție a ratei de transfer disponibile folosind rețele neuronale (Contribuția 7), demonstrând într-un scenariu de rutare multicale faptul că prin acest modul se poate îmbunătăți performanța rețelei.

## 10.3 Premii obținute

- **Second Special Prize** în cadrul sesiunii de comunicări științifice în electronică și telecomunicații "SSET 2010 – 6th Symposium for Students in Electronics and Telecommunications", organizată de către Facultatea de Electronică, Telecomunicații și Tehnologia Informației din cadrul Universității Tehnice din Cluj-Napoca, cu articolul "Preliminary Implementation of a Situation Aware Multipath Routing Algorithm" (autori: Georgeta Boanea, Melinda Barabás, Andrei Bogdan Rus), Cluj-Napoca, România, 27 mai 2010.

- Selectarea lucrării "Routing Management Based on Statistical Cross-Layer QoS Information Regarding Link Status" prezentată la conferința *KTTO 2011 – 11th International Conference on Knowledge in Telecommunication Technologies and Optics* pentru varianta extinsă publicată în revista *Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review)* (ISSN 0033-2097), indexată Thomson ISI Web of Science.

## 10.4 Lista de publicații

### Cărți

- [Cor11] L. M. Correia, H. Abramowicz, M. Johnsson, K. Wüstel (editors); V. Dobrota, **M. Barabas**, G. Boanea (included in the list of contributors) et al., "CLQ-Based Testbed used for Generic Path", Chapter 12 "Prototype Implementations", pp. 271–276, *Architecture and Design for the Future Internet. 4WARD Project*. 1st Edition, Springer Science + Business Media, ISBN 978-90-481-9345-5, 2011.

### Articole indexate BDI

- [Bar09] **M. Barabas**, G. Boanea, K. Steenhaut, V. Dobrota, "Evaluating the Performances of the CastGate Tunnel Server over TCP and UDP Links in Multi-Client Configuration", *ACTA TECHNICA NAPOCENSIS Electronics and Telecommunications*, ISSN 1221-6542, Volume 50, Number 4, pp. 32–37. TUCN, Romania, 2009.
- [Bar11b] **M. Barabas**, G. Boanea, A. B. Rus, V. Dobrota, "Routing Management Based on Statistical Cross-Layer QoS Information Regarding Link Status", *KTTO 2011 – 11th International Conference on Knowledge in Telecommunication Technologies and Optics*, ISBN 978-80-248-2399-7, pp. 8–13. Szczyrk, Poland, June 22–24, 2011.
- [Bar11c] **M. Barabas**, G. Boanea, A. B. Rus, V. Dobrota, J. Domingo-Pascual, "Evaluation of Network Traffic Prediction Based on Neural Networks with Multi-task Learning and Multiresolution Decomposition", *ICCP 2011 – 7th IEEE International Conference on Intelligent Computer Communication and Processing*, ISBN 978-1-4577-1478-8, pp. 95–102. Cluj-Napoca, Romania, August 25–27, 2011.
- [Bar11d] **M. Barabas**, G. Boanea, V. Dobrota, "Multipath Routing Management using Neural Networks-based Traffic Prediction", *EMERGING 2011 – The Third International Conference on Emerging Network Intelligence*, ISBN 978-1-61208-174-8. Lisbon, Portugal, November 20–25, 2011. (accepted)
- [Boa10a] G. Boanea, **M. Barabas**, A. B. Rus, V. Dobrota, "Design Principles and Practical Implementation of a Situation Aware Multipath Routing Algorithm", *SoftCOM 2010 – 18th IEEE International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks*, ISBN 978-1-4244-8663-2, pp. 321–325. Split-Bol, Croatia, September 23–25, 2010.
- [Boa11a] G. Boanea, **M. Barabas**, A. B. Rus, V. Dobrota, J. Domingo-Pascual, "Performance Evaluation of a Situation Aware Multipath Routing Solution", *10th RoEduNet International Conference "Networking in Education and Research"*, ISSN 2247-5443, pp. 51–56. Iasi, Romania, June 23–25, 2011.
- [Boa11b] G. Boanea, **M. Barabas**, V. Dobrota, "An Overview of Today's Multipath Routing", *ACTA TECHNICA NAPOCENSIS Electronics and Telecommunications*, ISSN 1221-6542, Volume 52, Number 3. TUCN, Romania, 2011. (submitted)

- [Pol09] Zs. Polgar, Zs. Kiss, A. B. Rus, G. Boanea, **M. Barabas**, V. Dobrota, "Preliminary Implementation of Point-to-Multi-Point Multicast Transmission Based on Cross-Layer QoS and Network Coding", *SoftCOM 2009 – 17th International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks*, ISBN 978-1-4244-4973-6, pp. 131-135. Split–Hvar–Korkula, Croatia, September 24–26, 2009.
- [Rus10a] A. B. Rus, **M. Barabas**, G. Boanea, Zs. Kiss, Zs. Polgar, V. Dobrota, "Cross-Layer QoS and Its Application in Congestion Control", *LANMAN 2010 – 17th IEEE Workshop on Local and Metropolitan Area Networks*, ISSN 1944-0367, Print ISBN 978-1-4244-6067-0, pp. 1–6. Long Branch, USA, May 5–7, 2010.
- [Rus10b] A. B. Rus, V. Dobrota, A. Vedinas, G. Boanea, **M. Barabas**, "Modified Dijkstra's Algorithm with Cross-Layer QoS", *ACTA TECHNICA NAPOCENSIS Electronics and Telecommunications*, ISSN 1221-6542, Volume 51, Number 3, pp. 75–80. Technical University of Cluj-Napoca, Romania, 2010.
- [Rus10c] A. B. Rus, **M. Barabas**, G. Boanea, V. Dobrota, "Implementation of QoS-Aware Virtual Routers", *ISETC 2010 – 9th International Symposium on Electronics and Telecommunications*, ISBN 978-1-4244-8457-7, pp. 161–164. Timisoara, Romania, November 11–12, 2010.

### Rapoarte de cercetare științifică

- [Bar10a] **M. Barabas**, "Stadiul actual al managementului rutării", Raport de cercetare științifică 1. *Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca*, România, Martie 2010.
- [Bar10b] **M. Barabas**, "Evaluarea performanțelor managementului rutării", Raport de cercetare științifică 2. *Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca*, România, Iulie 2010.
- [Bar11a] **M. Barabas**, "Managementul adaptiv al rutării", Raport de cercetare științifică 3. *Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca*, România, Martie 2011.

### Alte articole

- [Boa10b] G. Boanea, **M. Barabas**, A. B. Rus, V. Dobrota, "Preliminary Implementation of a Situation Aware Multipath Routing Algorithm", *Novice Insights in Electronics, Communications and Information Technology*, Issue 9, pp. 58–63. Technical University of Cluj-Napoca, Romania, 2010.

### Proiecte în care am fost implicată

- POSDRU 6/1.5/S/5 ID 7676 — Proiect de dezvoltare a studiilor de doctorat în tehnologii avansate – "PRODOC", 2008–2011
- FP7-ICT-2007-1 No. 216041 "4WARD — Architecture and Design for the Future Internet", 2008–2010



## Bibliografie selectivă

- [Abd05] A. Abdenmour, "Short-term MPEG-4 video traffic prediction using ANFIS", *International Journal of Network Management*, ISSN 1099-1190, Volume 15, Issue 6, pp. 377–392, 2005.
- [Ana08] N. C. Anand, C. Scoglio, B. Natarajan, "GARCh – Non-Linear Time Series Model for Traffic Modeling and Prediction", *NOMS 2008 – IEEE Network Operations and Management Symposium*, ISSN 1542-1201, ISBN 978-1-4244-2065-0, pp. 694–697. Salvador, Brazil, 2008.
- [Bal09] S. Balasubramaniam, D. Botvich, B. Jennings, S. Davy, W. Donnelly, J. Strassner, "Policy-constrained Bio-inspired Processes for Autonomic Route Management", *Computer Networks: The International Journal of Computer and Telecommunications Networking*, ISSN 1389-1286, Volume 53, Issue 10, pp. 1666–1682. Elsevier North-Holland, 2009.
- [Bar09] **M. Barabas**, G. Boanea, K. Steenhaut, V. Dobrota, "Evaluating the Performances of the CastGate Tunnel Server over TCP and UDP Links in Multi-Client Configuration", *ACTA TECHNICA NAPOCENSIS Electronics and Telecommunications*, ISSN 1221-6542, Volume 50, Number 4, pp. 32–37. Technical University of Cluj-Napoca, Romania, 2009.
- [Bar10a] **M. Barabas**, "Stadiul actual al managementului rutării", Raport de cercetare științifică 1. *Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca*, România, 2010.
- [Bar10b] **M. Barabas**, "Evaluarea performanțelor managementului rutării", Raport de cercetare științifică 2. *Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca*, România, 2010.
- [Bar11a] **M. Barabas**, "Managementul adaptiv al rutării", Raport de cercetare științifică 3. *Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca*, România, 2011.
- [Bar11b] **M. Barabas**, G. Boanea, A. B. Rus, V. Dobrota, "Routing Management Based on Statistical Cross-Layer QoS Information Regarding Link Status", *KTTO 2011 – 11th International Conference on Knowledge in Telecommunication Technologies and Optics*, ISBN 978-80-248-2399-7, pp. 8–13. Szczyrk, Poland, 2011.
- [Bar11c] **M. Barabas**, G. Boanea, A. B. Rus, V. Dobrota, J. Domingo-Pascual, "Evaluation of Network Traffic Prediction Based on Neural Networks with Multi-task Learning and Multiresolution Decomposition", *ICCP 2011 – 7th IEEE International Conference on Intelligent Computer Communication and Processing*, ISBN 978-1-4577-1478-8, pp. 95–102. Cluj-Napoca, Romania, 2011.
- [Bar11d] **M. Barabas**, G. Boanea, V. Dobrota, "Multipath Routing Management using Neural Networks-based Traffic Prediction", *EMERGING 2011 – 3rd International Conference on Emerging Network Intelligence*, ISBN 978-1-61208-174-8. Lisbon, Portugal, 2011. (accepted)
- [Ber07] L. Bernstein, "Network Management Isn't Dying, It's Just Fading Away", *Journal of Network and Systems Management*, ISSN 1064-7570, Volume 15, Issue 4, pp. 419–424, 2007.
- [Boa10a] G. Boanea, **M. Barabas**, A. B. Rus, V. Dobrota, "Design Principles and Practical Implementation of a Situation Aware Multipath Routing Algorithm", *SoftCOM 2010 – 18th IEEE International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks*, ISBN 978-1-4244-8663-2, pp. 321–325. Split–Bol, Croatia, 2010.
- [Boa10b] G. Boanea, **M. Barabas**, A. B. Rus, V. Dobrota, "Preliminary Implementation of a Situation Aware Multipath Routing Algorithm", *Novice Insights in Electronics, Communications and Information Technology*, ISSN 1842-6085, Issue 9, pp. 58–63. TUCN, Romania, 2010.
- [Boa11a] G. Boanea, **M. Barabas**, A. B. Rus, V. Dobrota, J. Domingo-Pascual, "Performance Evaluation of a Situation Aware Multipath Routing Solution", *10th RoEduNet International Conference "Networking in Education and Research"*, ISSN 2247-5443, pp. 51–56. Iasi, Romania,



- 2011.
- [Boa11b] G. Boanea, **M. Barabas**, V. Dobrota, "An Overview of Today's Multipath Routing", *ACTA TECHNICA NAPOCENSIS Electronics and Telecommunications*, ISSN 1221-6542, Volume 52, Number 3, pp. Technical University of Cluj-Napoca, Romania, 2011. (submitted)
- [Boa11c] G. Boanea, "Îmbunătățirea rutării multicale în viitorul Internet", Teză de doctorat, *Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca*, România, 2011.
- [Bro02] P. J. Brockwell, R. A. Davis, *Introduction to Time Series and Forecasting*, Second Edition. Springer Science+Business Media LLC, ISBN 978-0-387-95351-9, 2002.
- [Bru08] M. Brunner, "In-Network Management: A new Paradigm for Managing the Future Internet", *FIA – Future Internet Assembly*. Madrid, Spain, 2008.
- [Cai10] L. Cai, J. Wang, C. Wang, L. Han, "A Novel Forwarding Algorithm over Multipath Network", *ICCD 2010 – International Conference on Computer Design and Applications*, ISBN 978-1-4244-7164-5, pp. V5-353–V5-357. Qinhuangdao, China, 2010.
- [Che06] Y. Cheng, R. Farha, M. Sup Kom, A. Leon-Garcia, J. W.-K. Hong, "A Generic Architecture for Autonomic Service and Network Management", *Computer Communications*, ISSN 0140-3664, Volume 29, Issue 18, pp. 3691–3709. Elsevier Science Publishers, 2006.
- [Che11] L. Chen, T. Ho, M. Chiang, S. H. Low, J. C. Doyle, "Congestion Control for Multicast Flows with Network Coding". Submitted to *IEEE Transactions on Information Theory*.
- [Chu08] F.-L. Chu, "Analyzing and forecasting tourism demand with ARAR algorithm", *Tourism Management*, ISSN: 0261-5177, Volume 29, Issue 6, pp. 1185–1196. Elsevier Ltd., 2008.
- [Chu10] Y.-R. Chuang, C.-S. Hsu, J.-W. Chen, "Implementation of a Smart Traffic Prediction and Flow Control Mechanism for Video Streaming", *IHH-MSP 2010 – Sixth International Conference on Intelligent Information Hiding and Multimedia Signal Processing*, ISBN 978-1-4244-8378-5, pp. 240–243. Darmstadt, Germany, 2010.
- [Cle07] A. Clemm, *Network Management Fundamentals*, First Edition. Cisco Press, ISBN 978-1-58705-280-4, 2007.
- [Cor06] P. Cortez, M. Rio, M. Rocha, P. Sousa, "Internet Traffic Forecasting using Neural Networks", *IJCNN 2006 – International Joint Conference on Neural Networks*, ISBN 0-7803-9490-9, pp. 2635–2642. Vancouver, Canada, 2006.
- [Cor11] L. M. Correia, H. Abramowicz, M. Johnsson, K. Wüstel (editors); V. Dobrota, Z. Polgar, A. B. Rus, **M. Barabas**, G. Boanea (included in the list of contributors), "CLQ-Based Testbed used for Generic Path", Chapter 12 "Prototype Implementations", pp. 271–276, *Architecture and Design for the Future Internet. 4WARD Project*. Series: Signals and Communication Technology. 1st Edition, Springer Science + Business Media, ISBN 978-90-481-9345-5, 2011.
- [Das08] M. Dashevskiy, Z. Luo, "Network Traffic Demand Prediction with Confidence", *GLOBE-COM 2008 – IEEE Global Telecommunications Conference*, ISSN 1930-529X, Print ISBN 978-1-4244-2324-8, pp. 1–5. New Orleans, USA, 2008.
- [Day08] J. Day, *Patterns in Network Architecture: A Return to Fundamentals*. Prentice Hall, ISBN 978-0-132-25242-3, 2008.
- [Dha10] V. B. Dharmadhikari, J. D. Gavade, "An NN Approach for MPEG Video Traffic Prediction", *ICSTE 2010 – 2nd International Conference on Software Technology and Engineering*, ISBN 978-1-4244-8667-0, pp. V1-57–V1-61. San Juan, USA, 2010.
- [Fan07] Z. Fan, "Bandwidth Allocation for MPEG-4 Traffic in IEEE 802.11e Wireless Networks Based on Traffic Prediction", *FGCN 2007 – Future Generation Communication and Networking*, ISBN 0-7695-3048-6, pp. 191–196. Jeju-Island, Korea, 2007.
- [Far05] R. Farha, M. S. Kim, A. Leon-Garcia, J. W.-K. Hong, "Towards an Autonomic Service Architecture", *IPOM 2005 – 5th IEEE International Workshop on IP Operations and Management*, ISBN 978-3-540-29356-9, ISSN 0302-9743, Lecture Notes in Computer Science, Volume 3751, pp. 58–67. Barcelona, Spain, 2005.
- [Fen05] H. Feng; Y. Shu, "Study on Network Traffic Prediction Techniques", *WiCOM 2005 – International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing*,

- ISBN 0-7803-9335-X, pp. 1041–1044. Wuhan, China, 2005.
- [Gal08] A. Galis et al., *Autonomic Internet Initial Framework – Deliverable D6.1*, Technical report, Autonomic Internet (AutoI) Project, 2008.
- [Gup06] A. Gupta, "Network Management: Current Trends and Future Perspectives", *Journal of Network and Systems Management*, ISSN 1064-7570, Volume 14, Number 4, pp. 483–491, 2006.
- [Guo09] Z. Guo, S. Sheikh, C. Al-Najjar, H. Kim, B. Malakooti, "Mobile ad hoc network proactive routing with delay prediction using neural network", *Wireless Networks: The Journal of Mobile Communication, Computation and Information*, ISSN 1022-0038, Volume 16, Number 6, pp. 247–262. Springer Netherlands, 2009.
- [Jen07] B. Jennings, S. van der Meer, S. Balasubramaniam, D. Botvich, M. O Foghlu, W. Donnelly, J. Strassner, "Towards Autonomic Management of Communications Networks", *IEEE Communications Magazine*, ISSN 0163-6804, Volume 45, Issue 10, pp. 112–121, 2007.
- [Ju08] Suyang Ju, J. B. Evans, "Intelligent Multi-Path Selection Based on Parameters Prediction", *ICC 2008 – IEEE International Conference on Communications Workshops*, ISBN 1-4244-2051-3, pp. 529–534. Beijing, China, 2008.
- [Kis11] Zs. I. Kiss, Zs. A. Polgar, C. Vinti, M. Varga, A. B. Rus, V. Dobrota, "Network Coding-Based Congestion Control at Network Layer: Protocol Design and Evaluation", *International Journal of Computer Networks & Communications*, ISSN 0975-2293, Volume 3, Number 1, pp. 119–138. 2011.
- [Kou08] A. Kousaridas et al., *Automatic Gear Change for the Future Internet*, Self-NET White Paper, 2008.
- [Kul10] P. Kulkarni, T. Lewis, Z. Fan, "Simple Traffic Prediction Mechanism and its Applications in Wireless Networks", *Wireless Personal Communications*, ISSN 0929-6212, Volume 59, Number 2, pp. 261–274. Springer Netherlands, 2010.
- [Li09a] Z. Li, R. Wang, J. Bi, "A Multipath Routing Algorithm Based on Traffic Prediction in Wireless Mesh Networks", *ICNC 2009 – Fifth International Conference on Natural Computation*, ISBN 978-0-7695-3736-8, pp. 115–119. Tianjin, China, 2009.
- [Li09b] Y. Li, Z. Li, M. Chiang, A. R. Calderbank, "Content-Aware Distortion-Fair Video Streaming in Congested Networks", *IEEE Transactions on Multimedia*, ISSN 1520-9210, Volume 11, Issue 6, pp. 1182–1191. IEEE Signal Processing Society, 2009.
- [Lia04] Y. Liang, "Real-Time VBR Video Traffic Prediction for Dynamic Bandwidth Allocation", *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews*, ISSN 1094-6977, Volume 34, Issue 1, pp. 32–47. IEEE Systems, Man, and Cybernetics Society, 2004.
- [Lia06] Y. Liang, X. Liang, "Improving Signal Prediction Performance of Neural Networks Through Multiresolution Learning Approach", *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, ISSN 1083-4419, Volume 36, Issue 2, pp. 341–352, 2006.
- [Lip10] M. S. H. Lipu, M. N.-U. Haque, T. F. Karim, M. L. Rahman, M. H. Morshed, "Quality of Service Model Selection Criteria and Traffic Controlling Algorithm of a Native IP Network", *ICEIT 2010 – International Conference on Educational and Information Technology*, ISBN 978-1-4244-8033-3, pp. V3-144–V3-148. Chongqing, China, 2010.
- [Lop10] R. Lopez, *Flood: An Open Source Neural Networks C++ Library (Version 3) [software]*, 2010. Retrieved from [www.cimne.com/flood](http://www.cimne.com/flood)
- [Mar99] J. P. Martin-Flatin, S. Znaty, J. P. Hubaux, "A Survey of Distributed Enterprise Network and Systems Management Paradigms", *Journal of Network and Systems Management*, ISSN 1064-7570, Volume 7, Issue 1, pp. 9–26. Springer New York, 1999.
- [Mar06] E. Marin-Tordera, X. Masip-Bruin, S. Sanchez-Lopez, J. Domingo-Pascual, A. Orda, "The Prediction Approach in QoS Routing", *ICC 2006 – IEEE International Conference on Communications*, ISSN 8164-9547, ISBN 1-4244-0355-3, pp. 1020–1025. Istanbul, Turkey, 2006.
- [Mas10] X. Masip-Bruin, E. Marin-Tordera, M. Yannuzzi, R. Serral-Gracia, S. Sanchez-Lopez, "Re-

- ducing the Effects of Routing Inaccuracy by Means of Prediction and an Innovative Link-State Cost", *IEEE Communications Letters*, ISSN 1089-7798, Volume 14/5, pp. 492–494, 2010.
- [Med07] D. Medhi, "Routing Management in the PSTN and the Internet: A Historical Perspective", *Journal of Network and Systems Management*, ISSN 1064-7570, Volume 15, Number 4, pp. 503–523. Springer New York, 2007.
- [Mih09a] A. Mihailovic (editor), "State of the Art and Outlooks for Dynamic Protocol Configuration and Re-engineering Future Internet Operations", Self-NET Deliverable D3.1, 2009.
- [Mih09b] A. Mihailovic, "SELF-NET project on Fusion of Self-Management and Future Internet", *SELF-NET consortium – Workshop on Autonomic Management*. University College London, UK, 2009.
- [Nun09] G. Nunzi, D. Dudkowski (editors), *D-4.2 In-Network Management Concept*, FP7-ICT-2007-1-216041-4WARD — "Architecture and Design for the Future Internet", 2009.
- [Par09] D.-C. Park, "Prediction of MPEG Traffic Data Using a Bilinear Recurrent Neural Network with Adaptive Training", *ICCET 2009 – International Conference on Computer Engineering and Technology*, ISBN 978-0-7695-3521-0, pp. 53–57. Singapore, 2009.
- [Pav07] G. Pavlou, "On the Evolution of Management Approaches, Frameworks and Protocols: A Historical Perspective", *Journal of Network and Systems Management*, ISSN 1064-7570, Volume 15, Number 4, pp. 425–445. Springer New York, 2007.
- [Pol09] Zs. Polgar, Zs. Kiss, A. B. Rus, G. Boanea, **M. Barabas**, V. Dobrota, "Preliminary Implementation of Point-to-Multi-Point Multicast Transmission Based on Cross-Layer QoS and Network Coding", *SoftCOM 2009 – 17th IEEE International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks*, ISBN 978-1-4244-4973-6, pp. 131-135. Split, Croatia, 2009.
- [Qaz11] I. A. Qazi, T. Znati, "On the design of load factor based congestion control protocols for next-generation networks", *Computer Networks: The International Journal of Computer and Telecommunications Networking*, ISSN 1389-1286, Volume 55, Issue 1, pp. 45–60, 2011.
- [Quagga] Quagga Routing Software Suite, <http://www.quagga.net/>
- [Rod10] J. Rodrigues, A. Nogueira, P. Salvador, "Improving the Traffic Prediction Capability of Neural Networks Using Sliding Window and Multi-task Learning Mechanisms", *INTERNET 2010 – Second International Conference on Evolving Internet*, ISSN 2156-7190, Print ISBN 978-1-4244-8150-7, pp. 1–8. Valencia, Spain, 2010.
- [Rot09] R. Roth, F. Wolff, T. Zseby (editors), *D-4.1 Definition of scenarios and use cases*, FP7-ICT-2007-1-216041-4WARD — "Architecture and Design for the Future Internet", 2009.
- [Rus10a] A. B. Rus, **M. Barabas**, G. Boanea, Zs. Kiss, Zs. Polgar, V. Dobrota, "Cross-Layer QoS and Its Application in Congestion Control", *LANMAN 2010 – 17th IEEE Workshop on Local and Metropolitan Area Networks*, ISSN 1944-0367, Print ISBN 978-1-4244-6067-0, pp. 1–6. Long Branch, USA, 2010.
- [Rus10b] A. B. Rus, V. Dobrota, A. Vedinias, G. Boanea, **M. Barabas**, *Modified Dijkstra's Algorithm with Cross-Layer QoS*, ACTA TECHNICA NAPOCENSIS Electronics and Telecommunications, ISSN 1221-6542, Volume 51, Number 3, pp. 75–80. TUCN, Romania, 2010.
- [Rus10c] A. B. Rus, **M. Barabas**, G. Boanea, V. Dobrota, "Implementation of QoS-Aware Virtual Routers", *ISETC 2010 – 9th International Symposium on Electronics and Telecommunications*, ISBN 978-1-4244-8457-7, pp. 161–164. Timisoara, Romania, 2010.
- [Rus11] A. B. Rus, "Quality of Service through Cross-Layer Techniques for the Future Internet", PhD Thesis, *Technical University of Cluj-Napoca*. Cluj-Napoca, Romania, 2011.